

Завадский Д.И., Ташлыков О.Л.

ОПТИМИЗАЦИЯ РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ ПЕРСОНАЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ BIM-ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Аннотация. Показана перспектива использования трёхмерного BIM-проектирования зданий и сооружений атомной энергетики с целью оптимизации радиационной защиты персонала, а также создания базы данных объекта на этапе строительства и эксплуатации. В качестве примеров рассмотрены варианты создания двух моделей: помещения системы компенсации давления выводимого из эксплуатации ВВЭР-210 и технологического помещения с оборудованием, гидравлической обвязкой и запорной арматурой. Для данных моделей созданы основные узлы оборудования, указаны точки радиационного контроля, а также смонтированы анимированные видеоролики. Используются программы AutoDesk Revit (для проектирования) и AutoDesk 3DS Max (для анимирования и рендеринга).

Ключевые слова: доза облучения; оптимизация радиационной защиты; сокращение времени пребывания персонала в полях ионизирующих излучений; виртуальное обучение, 3D проектирование, BIM-проектирование.

Abstract. The perspective of using three-dimensional BIM design of buildings and constructions for atomic engineering with aim to optimize radiation protection of personnel and to create database at the stage of construction and operation. As an example considered the creation of pressure compensator tank rooms of decommissioned PWR (VVER-210) and process room with hydraulic strapping, shut-off valves and other equipment. There are two program used in this report: AutoDesk Revit (for designing) and AutoDesk 3DS Max (for animation creating and rendering).

Keywords: radiation dose; radiation protection optimization; reduction of the staff time of stay in the fields of ionizing radiation; virtual training, 3D design, BIM-design.

Введение

За последние 25 лет после утверждения НРБ-96 и начала переходного периода на новые более жесткие дозовые пределы средневзвешенные значения коллективной дозы облучения персонала всех АЭС России в пересчете на один энергоблок уменьшились более чем в 3 раза и находятся в некотором стационарном состоянии, незначительно изменяясь год от года в зависимости от объема и продолжительности ремонтных работ. Исключено несанкционированное превышение индивидуальной дозы облучения 18 мЗв в год. Полученные результаты достигнуты в условиях значительного увеличения радиационно-опасных работ, связанных с продлением сроков эксплуатации энергоблоков на большинстве российских АЭС и восстановлением ресурсных характеристик на АЭС с РБМК [1].

5. Perspectives for Ag₂S NIR-II nanoparticles in biomedicine: from imaging to multifunctionality / Y. Shen, J. Lifante, E. Ximendes [et al.] // *Nanoscale*. – 2019. – Vol. 11, Is. 41. – P. 19251–19264.
6. Label-free fluorometric assay for cytochrome c in apoptotic cells based on near infrared Ag₂S quantum dots / M. Cai, Caiping Ding, Xuanyu Cao [et al.] // *Analytica chimica acta*. – 2019. – Vol. 1056. – P. 153–160.
7. Electrodeposition of Ag₂S film from aqueous bath / C. D. Lokhande, P. S. Patil, V. S. Yermune, S. H. Pawar [et al.] // *Bulletin of Electrochemistry*. – 1990. – Vol. 6. – P. 842–844.
8. Some Physical Investigations on Ag₂S Thin Films Prepared by Sequential Thermal Evaporation / T. B. Nasrallah, H. Dlala, M. Amlouk [et al.] // *Synthetic Metals*. – 2005. – Vol. 151, Is. 3. – P. 225–230.
9. Crystalline Structure and Phase Composition of Epi-taxially Grown Ag₂S Thin Films / D. Karashanova, K. Starbova, N. Starbov, N. Starbov [et al.] // *Solid State Ionics*. – 2004. – Vol. 171, Is. 3/4. – P. 269–275.
10. Structural, Optical and Electrical Properties of Thermally Evaporated Ag₂S Thin Films / M. M. El-Nahass, A. A. M. Farag, E. M. Ibrahim, S. Abd-El-Rahman // *Vacuum*. – 2004. – Vol. 72, Is. 4. – P. 453–460.
11. Stabilization of Ag₂S nanoparticles in aqueous solution by MPS / Y. V. Kuznetsova, S. V. Rempel, I. D. Popov [et al.] // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2017. – Vol. 520. – P. 369–377.
12. Ершов А. Е. Коллоидные структуры с различной морфологией: синтез, оптические свойства и оптодинамические явления : спец. 01.04.05 «Оптика» : дис. ... канд. физ.-мат. наук / А. Е. Ершов ; Ин-т физики им. Л. В. Кирен. Сиб. отд-я Рос. акад. наук. – Красноярск, 2014. – 139 с.
13. Measuring sub nanometer sizes using dynamic light scattering / M. Kaszuba, D. McKnight, M. T. Connah [et al.] // *J. Nanoparticle Res.* – 2008. – Vol. 10. – P. 823–829.
14. Zero K. Dynamic depolarized light scattering / K. Zero, R. Pecora // *Dynamic Light Scattering*. – Boston : Springer MA, 1985. – P. 59–83.
15. Selforganization of nanoparticles in the system of silver-sulfide-mercaptopropylsilane / I. A. Balyakin, S. V. Rempel, Y. V. Kuznetsova [et al.]. – DOI <https://doi.org/10.1063/1.5002899> // *AIP Conference Proceedings*. – 2017. – Vol. 1886. – P. 020002.
16. Модуль обработки изображений Image Analysis P9 : справ. рук. – Москва : ИТ-МДТ, 2017. – 532 р.

по диаметру частиц. В зависимости от использования, разбавленного и неразбавленного в спирте МПС, и молярных соотношений исходных растворов меняется распределение частиц Ag_2S по размерам и распределение частиц по поверхности тонкой пленки. Количество частиц на поверхности образца больше на образце с разбавленным в спирте МПС. Количество частиц на поверхности образца увеличивается с увеличением концентраций AgNO_3 и Na_2S . С увеличением концентрации AgNO_3 к Na_2S происходит укрупнение частиц.

Заключение

При синтезе коллоидного раствора с наночастицами Ag_2S в качестве стабилизирующего агента использованы молекулы МПС. В зависимости от концентраций AgNO_3 и Na_2S при синтезе наночастиц Ag_2S меняется распределение частиц Ag_2S по размерам и значение дзета-потенциала. Определена область стабильности коллоидного раствора сульфида серебра. Предложенный вариант создания тонких пленок с использованием неразбавленного в спирте МПС способствовал закреплению на поверхности подложки большого количества более маленьких по размеру частиц. Количество частиц на поверхности образца больше на образце с разбавленным в спирте МПС. При исследовании многослойных пленок обнаружена самоорганизация в виде скопления колец и полуколец на поверхности тонких пленок. Размер представленных скоплений составляет от 0.5 до 15 мкм.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда [проект №. 19-73-20012].

Библиографический список

1. Kuznetsova Y. V. Synthesis and optical properties of nanocomposite based on CdS nanoparticles in a silicon oxide matrix / Y. V. Kuznetsova, I. B. Dorosheva, S. V. Rempel // AIP Conference Proceedings. – 2018. – Vol. 2015, Is. 1. – P. 020054.
2. Rempel S. V. Reduction of colloidal Ag_2S to binary $\text{Ag}_{2-x}\text{S}/\text{Ag}$ nanoparticles under UV and visible irradiation / S. V. Rempel, Y. V. Kuznetsova, A. A. Rempel // Mendelev Communications. – 2018. – Vol. 28, Is. 1. – P. 96–98.
3. The irradiation influence on the properties of silver sulfide (Ag_2S) colloidal nanoparticles / S. V. Rempel, Yu. V. Kuznetsova, E. Yu. Gerasimov [et al.] // Physics of the Solid State. – 2017. – Vol. 59, Is. 8. – P. 1629–1636.
4. Influence of the size and charge of nonstoichiometric silver sulfide nanoparticles on their interaction with blood cells / S. V. Rempel, N. N. Aleksandrova, Yu. V. Kuznetsova [et al.] // Inorganic Materials. – 2016. – Vol. 52, Is. 2. – P. 101–105.

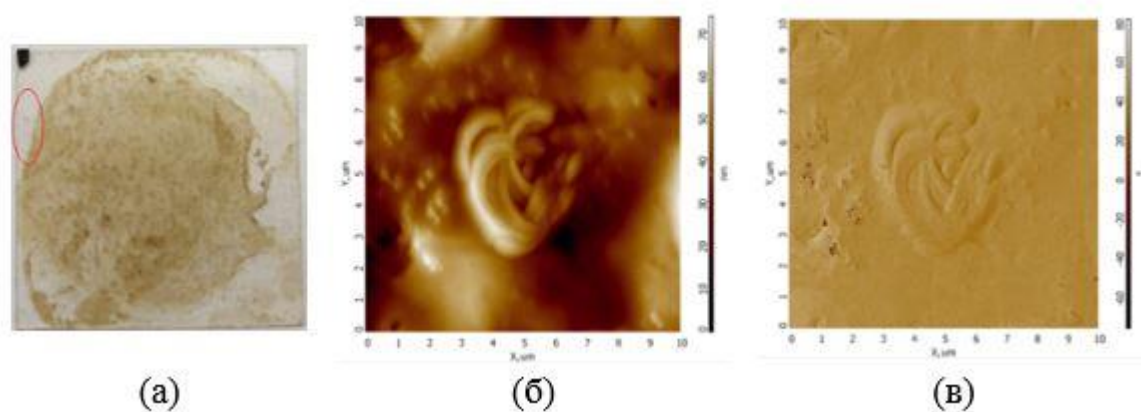


Рисунок 3 – Изображение полуколец на поверхности пленки, полученные методами: а) оптической микроскопии и полуконтактной АСМ:
б) рельеф поверхности; в) фазовый контраст

Возможный механизм формирования тубулярных структур в подобных образцах был объяснен в [15]. Взаимодействие между наночастицами Ag_2S состоит из электростатического отталкивания и притяжения Ван-дер-Ваальса. Если наночастицы преодолевают потенциальный барьер, они могут образовывать связанное состояние через силоксановые связи между молекулами МПС.

Для анализа СЗМ-изображений использована программа Image Analysis от компании NT-MDT Spectrum Instruments. Для выделения на СЗМ-изображении локальных объектов (частиц или зерен) использован метод сегментации по морфологическим водоразделам (Watershed) [16]. При использовании данного метода были получены данные по геометрическим параметрам наночастиц. Результат представлен в таблице 3.

Таблица 3 – Размер агломератов тонких пленок

Образец	Диаметр агломератов пленки, нм
Ag_2S -4	159 ± 8
Ag_2S -5	93 ± 5
Ag_2S -6	122 ± 6

Анализ полученных данных показал, что наибольшее значение в процентном соотношении количества частиц в диапазоне наименьших значений диаметра частицы к общему числу частиц наблюдается в образце Ag_2S -5. Следовательно, предложенный вариант создания тонких пленок способствовал закреплению на поверхности подложки большого количества более маленьких

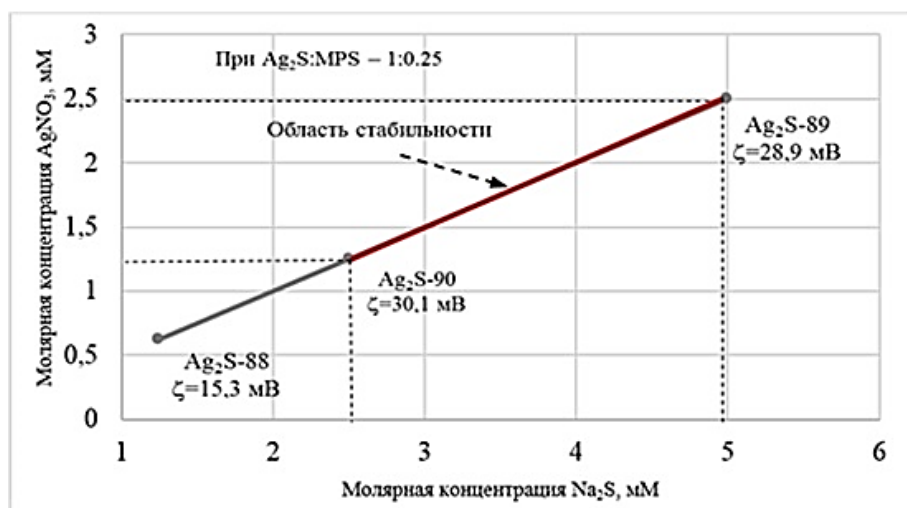


Рисунок 1 – Определение области стабильности коллоидного раствора, содержащего наночастицы Ag_2S .

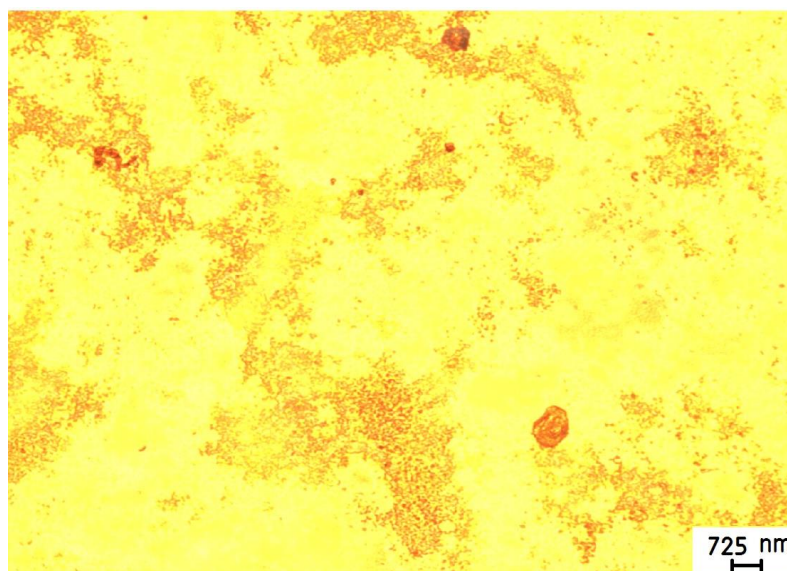


Рисунок 2 – Изображения образца Ag_2S -5 при увеличении в 20 раз

Особый интерес представляют образцы Ag_2S -4, Ag_2S -5, Ag_2S -6. На поверхности образцов появляются фрагменты в виде скоплений колец и полуколец (рис.3). Самоорганизация проявилась в процессе многослойного осаждения пленок. Размер представленных скоплений составляет от 0.5 до 15 мкм.

Для образцов Ag_2S -4 и Ag_2S -5 скопление колец и полуколец обнаружены на границе раздела сред (граница перехода части подложки, погруженной в коллоидный раствор, и не погруженной части подложки) или на границе формирования тонкой пленки. Это связано с интенсивностью конвективного потока (с уменьшением прихода частиц в зоне мениска). Этим же явлением можно объяснить и образование колец и полуколец в образце Ag_2S -6.

Результаты и обсуждение

Динамическое рассеяние света измеряет зависящие от времени флуктуации интенсивности рассеянного света, возникающие из-за того, что частицы испытывают броуновское движение [13, 14]. Скорость этого броуновского движения измеряется и называется коэффициентом поступательной диффузии D . Этот коэффициент диффузии преобразуется в гидродинамический диаметр частиц D_H с использованием уравнения Стокса-Эйнштейна. Размер частиц был выбран в качестве параметра качественного отклика на изменение концентраций $AgNO_3$ и Na_2S .

При изучении образцов Ag_2S -1, Ag_2S -2 и Ag_2S -3 методом динамического рассеяния света с помощью установки Zetasizer Nano ZS (Malvern Instruments Ltd) были получены данные по размеру и дзета-потенциалу наночастиц Ag_2S , которые представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Размер и дзета-потенциал наночастиц Ag_2S в водном коллоидном растворе

Образец	Размер наночастиц после синтеза, нм	Размер наночастиц через неделю после синтеза, нм	ζ , мВ
Ag_2S -1	2211 ± 938	–	15 ± 6
Ag_2S -2	66 ± 24	44 ± 15	29 ± 8
Ag_2S -3	56 ± 19	34 ± 14	30 ± 7

В растворе Ag_2S -1 после синтеза выпал осадок. Для установления стабильного состояния образцов Ag_2S -2 и Ag_2S -3 потребовалось около семи дней, и через неделю после синтеза средний размер наночастиц в коллоидном растворе уменьшился почти в полтора раза. Эти растворы оказались наиболее стабильными из представленных. Значение дзета-потенциала при этом составило около 30 мВ, свидетельствуя о высокой стабильности образцов.

На графике зависимости молярной концентрации $AgNO_3$ от молярной концентрации Na_2S была определена область стабильности коллоидного раствора сульфида серебра (рисунок 1).

На рисунке 2 представлен вид поверхности тонкой пленки образца Ag_2S -5. Анализ изображений полученных пленок показал, что в зависимости от МПС и концентрации исходных компонентов в растворе меняется распределение частиц Ag_2S по размерам и распределение частиц по поверхности тонкой пленки. Количество частиц на поверхности образца больше в образце с разбавленным в спирте МПС. С увеличением концентраций $AgNO_3$ к Na_2S количество частиц на поверхности образца увеличилось.

Получение тонких плёнок

В качестве подложки использованы покровные стекла из прозрачного бесцветного силикатного стекла марки Апекслаб, квадратной формы, размером 24x24 мм и толщиной 0,13-0,17 мм.

Для получения образцов Ag_2S -1, Ag_2S -2, Ag_2S -3 стеклянную подложку поместили на дно стакана с коллоидным раствором и оставили на 7 дней, затем подложки высушили, промыли дистиллированной водой и еще раз высушили.

В следующей серии образцов проводились эксперименты по послойному нанесению МПС и Ag_2S на подложку. Для создания тонких пленок образцов Ag_2S -4, Ag_2S -5, Ag_2S -6 условия синтеза исходных растворов в коллоидной системе были такими же, как у образца Ag_2S -2.

Для приготовления образцов Ag_2S -4, Ag_2S -5 применен метод подвижного мениска [12]. Метод заключается в осаждении частиц дисперсной фазы на стеклянную подложку, которая погружена в раствор под углом 45° к поверхности жидкости. Для создания образца Ag_2S -4 капнули на подложку смесь МПС в спирте и дали высохнуть. Затем поместили в стакан с коллоидным раствором под углом 45° на 7 дней. Для создания образца Ag_2S -5 капнули на подложку воду, а следом – неразбавленный МПС и дали высохнуть. Подложку поместили в стакан с коллоидным раствором под углом 45° на 7 дней.

Процедуру приготовления образца Ag_2S -6 можно считать вариантом создания многослойной пленки. Первым этапом капнули на подложку коллоидный раствор и дали высохнуть. Затем капнули на подложку неразбавленный МПС и также дали высохнуть. Повторили данную процедуру четыре раза в течении 7 дней.

Методы исследования

Гидродинамический диаметр D_h , распределение по размерам и дзета-потенциал наночастиц Ag_2S в растворе измеряли методом динамического рассеяния света, на Zetasizer Nano ZS (Malvern) при 25°C . Nano ZS содержит He-Ne-лазер мощностью 4 мВт, работающий на длине волны 633 нм. Рассеянный свет регистрируется под углами 13 или 173° . Образцы помещали в стандартные одноразовые капиллярные ячейки и кюветы из полистирола для измерения дзета-потенциала и размера, соответственно. Все измерения повторены 3 раза для хорошей статистики результата.

Полученные образцы тонких пленок были изучены с помощью оптического микроскопа Leica DM2500, оснащенным мощным осветителем 100 Вт и методом полуконтактной атомно-силовой микроскопии (АСМ) с помощью научного технического комплекса NTEGRA Prima II.

получения стабилизированных коллоидных наночастиц Ag_2S , покрытых (3-меркаптопропил) триметоксисиланом (МПС).

Целью настоящего исследования являлось изучение влияния стабилизирующего агента МПС, разбавленного и неразбавленного в спирте, на распределение частиц по поверхности подложки, а также влияния молярных соотношений AgNO_3 к Na_2S на распределение частиц Ag_2S по размерам.

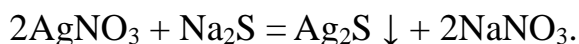
Образцы и методики эксперимента

Химические вещества

Для синтеза использовали (3-меркаптопропил) триметоксисилан (MPS, > 95%) $\text{HSC}_3\text{H}_6\text{Si}(\text{OCH}_3)_3$ от Sigma Aldrich, этанол (EtOH), нитрат серебра (AgNO_3) и сульфид натрия (Na_2S). Все химикаты аналитической чистоты (А.С.С) и использовались без дальнейшей очистки. Для приготовления образца использовалась дистиллированная вода.

Синтез наночастиц Ag_2S

Наночастицы Ag_2S в водном растворе синтезированы методом химической конденсации, который основан на реакции обмена между AgNO_3 и Na_2S [11]. Общее молекулярное уравнение можно записать следующим образом:



Для синтеза наночастиц использовалось молярное отношение МПС к раствору Ag_2S как 0.25:1. Для оценки влияния стабилизирующего агента в получении тонких пленок использовался разбавленный и неразбавленный в спирте МПС. Для оценки влияния концентраций растворов AgNO_3 и Na_2S на синтез наночастиц Ag_2S молярное отношение AgNO_3 к Na_2S изменяли следующим образом: 1.25:0.625; 2.5:1.25; 5:2.5.

Таблица 1 – Соотношение молярных концентраций растворов AgNO_3 и Na_2S

Образец	Условия синтеза исходных растворов	Ag_2S :МПС
Ag_2S -1	5 мл AgNO_3 5мМ + 5 мл Na_2S 2.5мМ + МПС	1:0.25
Ag_2S -2	5 мл AgNO_3 1.25мМ + 5 мл Na_2S 0.625 мМ + МПС	
Ag_2S -3	5 мл AgNO_3 2.5мМ + 5 мл Na_2S 1.25 мМ + МПС	

Воронцова Е.С., Кузнецова Ю.В., Ремпель С.В.

ПОЛУЧЕНИЕ И ИЗУЧЕНИЕ ПЛЕНОК ИЗ НАНОЧАСТИЦ Ag_2S , СТАБИЛИЗИРОВАННЫХ МПС

Аннотация. Методом химической конденсации синтезированы наночастицы Ag_2S в водном растворе. Для оценки влияния стабилизирующего агента использованы разбавленный и неразбавленный в спирте МПС, и различные молярные соотношения AgNO_3 к Na_2S . Из синтезированных коллоидных растворов Ag_2S несколькими способами изготовлены пленки. Коллоидные растворы и пленки изучались методами ДРС, оптической микроскопии и АСМ. Определена область стабильности коллоидного раствора сульфида серебра. Установлено, что размер частиц и распределение по размерам в пленках зависит от концентрации исходных реагентов. Предложен вариант создания тонких пленок с большим количеством агломератов, меньших по размеру, на поверхности подложки. Обнаружена самоорганизация наночастиц при формировании многослойной пленки диаметром от 0.5 до 15 мкм.

Ключевые слова: наночастицы сульфида серебра, триметоксисилан, метод химической конденсации, тонкие пленки, самоорганизация.

Abstract. Ag_2S nanoparticles were synthesized by the method of chemical condensation in an aqueous solution. To assess the effect of the stabilizing agent, diluted and undiluted in alcohol MPS and various molar ratios of AgNO_3 to Na_2S were used. The synthesized colloidal Ag_2S solutions were used to make films in several ways. The colloidal solutions and films were studied by dynamic light scattering, optical microscopy, and atomic force microscopy. The stability area of the colloidal Ag_2S solution was determined. It was found that the particle size and size distribution in the films depends on the concentration of the starting reagents. The method of creating a thin film with the smallest size of Ag_2S nanoparticles was developed. The self-organization of nanoparticles was discovered during the formation of a multilayer film with a diameter of particles from 0.5 to 15 μm .

Keywords: silver sulfide nanoparticles, trimethoxysilane, chemical condensation method, thin films, self-organization.

Введение

В настоящее время существует много способов создания веществ и материалов в нанокристаллическом состоянии. Особое внимание привлекают нанокристаллические полупроводниковые сульфиды [1], в том числе сульфид серебра (Ag_2S) [2, 3]. Ag_2S в наносостоянии представляет интерес благодаря возможности применения в оптоэлектронике, фотовольтаике и медицине [4-6]. Тонкие пленки Ag_2S используются в фотогальванических элементах и фотохимических ячейках [7, 8], в ИК-детекторах [9], преобразователях солнечной энергии [10]. Свойства Ag_2S изменяются в зависимости от размера и морфологии наночастиц, которые, в свою очередь, зависят от способа синтеза. В данной работе использован эффективный и воспроизводимый способ

5. Accenture, Global consumer shopping survey. – 2017. – URL: https://www.accenture.com/t20170210t012359__w__/us-en/_acnmedia/pdf-44/-accenture-retail-customer-journey-research-2017-infographic.pdf (accessed: 03.10.2019).
6. Interactions, The next generation of retail. – 2016. – URL: http://www.retailperceptions.com/wp-content/uploads/Retail_Perceptions_Report-_2016_07.pdf (accessed: 13.09.2019).
7. Accenture, Research “Who are the millennial shoppers? And what do they really want?”. – 2019. – URL: <https://www.accenture.com/us-en/insight-outlook-who-are-millennial-shoppers-what-do-they-really-want-retail> (accessed: 11.10.2019).
8. PBN N+K и MAGRAM MR, исследование сравнение российских миллениалов и центениалов, 2017. – URL: <https://adindex.ru/publication/analitics/search/2017/05/18/159832.phtml> (accessed: 11.10.2019).

Именно такие проекты в большей степени притягивают потребителей к бренду и формируют лояльность к нему.

Заключение

Существует теория поколений: людей схожего возраста объединяют определенные установки и ценности, которые сменяются каждые 20 лет.

Уже через несколько лет каждый четвертый сотрудник в компаниях будет являться зедом, не мыслящим жизни без интернета, загранпаспорта и лайков в соцсетях. При этом, основной костяк рынка труда будут по-прежнему составлять игреки, родившиеся в 1984–2000 годы, которые не хуже зедов владеют современными цифровыми инструментами и технологиями. Они более ответственны, но редко ставят карьеру главным приоритетом в жизни, потому что ценят жизнь и свободу. И, наконец, «иксы», рожденные с 1963 по 1984 годы, – трудоголики и прагматики, которые ценят профессиональное развитие и готовы учиться всю жизнь. Именно они сегодня занимают топовые должности и становятся лидерами, ведущими за собой миллениалов и вохновляющие центениалов.

Поколение Z привыкло получать информацию с помощью гаджетов, и эта тенденция в оцифровывающемся мире только усилится. Уже сейчас можно увидеть, что миллениалы существенно влияют на интернет-ритейл. Они меняют подход к дистрибуции и продолжают влиять на экономику, торговлю и маркетинг. Через год они будут обеспечивать до 50% всех продаж в ритейле, а со временем станут единственной платежеспособной частью населения. Чтобы через несколько лет не остаться без их внимания и суметь предложить удобный покупательский опыт, брендам и ритейлерам важно сегодня понять, чего хочет новое поколение, научиться взаимодействовать с более широким спектром устройств и каналов.

Библиографический список

1. Pew Research Center, Survey // Teens, Social Media & Technology. – 2018. – URL: <https://www.pewresearch.org/internet/2018/05/31/teens-social-media-technology-2018/> (accessed: 13.10.2019).
2. CivicScience // Millenials vs Gen Z. – 2016. – URL: <https://civicscience.com/reports/generational-divide-generation-z-vs-millennials/> (accessed: 13.11.2019).
3. Upfront Analytics, Marketing to Generation Z Teenagers. – 2015. – URL: <https://gettinggenz.com/2015/12/03/how-to-market-to-a-gen-z-teenager-infographic-by-upfront-analytics/> (accessed: 23.10.2019).
4. The Cassandra report, Gen Z-focused issue. – 2017. – URL: <https://cassandra.co/2017/the-gen-z-effect/gen-z-effect> (accessed: 13.12.2019).

По данным Deep Focus, миллениалы лучше реагируют на рекламу, создающую эмоциональный контакт (31% Y против 20% Z), а центениалов больше привлекает реклама со знаменитостями (27% у Z против 20% у Y). CivicScience подтверждает: рекомендации лидеров мнений в социальных сетях больше влияют на поколение Z (29%), чем на поколение Y (19%). Это снова подтверждает данные анализа триггеров к покупке, которые мы рассматривали во введении.

Всё это значит, что бренды должны понять разницу поколений и сформировать к ним индивидуальный подход. Продать продукт миллениалам помогает яркий опыт и обещание наслаждения жизнью, эмоциональный контакт, программа лояльности и постоянная онлайн-поддержка. И, обязательно, помнить – покупки миллениалы часто планируют заранее, а рекламу могут перепроверить.

Поколение Z легче принимает информацию на веру, проверяя данные рекламных сообщений лишь в 30% случаев против 40% объявлений у поколения Y. Но это вовсе не значит, что центениалов проще уговорить. Более того, их доверие легче потерять. Исследование креативного агентства Brand House показало, что у поколения Z отлично работает интуиция: молодые люди сразу видят нерелевантность или недостоверность рекламных текстов или роликов.

Около половины потребителей-центениалов интересуются социальной активностью бренда до покупки: значительная их часть готова бойкотировать компанию, если её ценности не соответствуют их собственным или нарушаются. То есть, одних слов о наличии ценностей недостаточно: потребители пристально следят за действиями. Бренды, не оправдывающие ценностей, которыми они по своему уверению дорожат, подвергают себя значительному риску. Сегодня понятие «социальности бизнеса» означает прежде всего то, что компания понимает ответственность своего бизнеса перед обществом и в рамках своей деятельности уделяет внимание социально значимым проблемам.

Эти тенденции создают огромные конкурентные преимущества для компаний, где социальная ответственность – часть внутреннего смысла бизнеса. Также они способствуют выходу устойчивого развития из ряда эксклюзивных сегментов рынка, становясь одним из важнейших элементов доверия к бренду.

Делать это можно разными путями, начиная от простой финансовой поддержки благотворительных организаций или фондов, заканчивая интересными внутрикорпоративными проектами, органично вплетающимися в деятельность компании и существенным образом дополняющими ее имидж.

посетителям за скромные 25\$ предоставляют напитки, пижаму и 45-минутный сон. Судя по инвестициям, стратеги онлайн-ритейлера уверены: сначала поколение Z будет отсыпаться на их матрасах после вечеринок, а потом купит Casper для своей семьи.

И это работает: на примере конкурента Casper – крупного офлайн-ритейлера матрасов Mattres Firm – мы видим, как offline-only сети задыхаются под напором онлайн-торговли. Бренд привлекает в свои точки продаж только 12% пешеходного трафика. Casper, будучи выскочкой из цифрового мира, значительно превосходит Mattress Firm на его собственной территории. Во многом – благодаря эффективности стратегии «онлайн плюс офлайн».

Но дело не только в этом подходе. Основанный в 2010 году онлайн-ритейлер одежды Everlane, декларировал основой своего бизнеса принципы, близкие поколению Z: этичность производства, качество продукции и прозрачность цен. Чтобы понять, успешен ли бренд среди заявленного поколения, возвращаемся к люфтам, показанным на иллюстрации: -3% для миллениалов и +110% для центениалов.

При этом, качество Everlane сравнимо с брендом Levi'S, но тот привлекает в магазины только 29% пешеходного трафика. Что Everlane делает иначе? Позиционирует бренд как «магазин прозрачных цен» и заявляет близкие поколению Z ценности.

Warby Parker – ритейлер очков. При анализе пешеходного трафика, обнаружим, что 87% покупателей по всей территории США посещали исключительно магазины Lens-crafters, 9% заходили только в Warby Parker и 4% были в магазинах обоих брендов. Если взглянуть на статистику только по Нью-Йорку, где у Warby Parker сосредоточена большая часть магазинов, цифры резко меняются: 69% ходят только в Lens-crafters, 21% – в Warby Parker. 10% покупателей заходят и туда, и туда.

То есть, распространённое мнение о том, что классическая торговля умирает, ошибочное. Умирают бренды, которые не могут перестроиться под требования новой эры, где главный покупатель – представитель поколения Z, отличающийся от своих предшественников.

Реклама и маркетинг для новых поколений

Чтобы донести свои сообщения до поколений Y и Z, бренды должны быть не только креативными, но честными, способными быстро реагировать на изменения рынка, а главное – лаконичными. Поколение Z концентрирует внимание на 25% хуже предшественников: миллениалы способны удерживать внимание 12 секунд, центениалы – всего 8.

Стратегии брендов по отношению к поколению Z

Чтобы лучше разобраться в паттернах поведения представителей поколения Z, мы проанализировали подход четырех гибких, по нашему мнению, цифровых ритейлеров – Amazon, Casper, Everlane и Warby Parker – к работе своих офлайн-точек с поколением Z (рисунок 3).

Lift*

	Millennials	Gen Z
AMAZON 4-STAR	5%	37%
CASPER	-2%	17%
EVERLANE	-3%	110%
WARBY PARKER	2%	37%
AVERAGE LIFT	1%	45%

Source: Ubimo's Polaris Data

* Lift is the percentage of a demographic that visited a store compared to their percentage of the entire population

Рисунок 3 – Процент населения, посетившего магазин, по отношению к числу всего населения

Разберем таблицу выше. Лишь 5% миллениалов против 37% представителей поколения Z посещают офлайн-магазины Amazon. Эти магазины Amazon не притягивают толпы миллениалов, но это нормально: офлайн-точки бренда рассчитаны на более молодых покупателей. Динамика развития сферы e-commerce и, в частности, Amazon, говорит, что миллениалы продолжают покупать в интернете.

Теперь о стратегиях. Онлайн-ритейлер матрасов Casper вошел в физическое торговое пространство в конце 2018 года, используя агрессивную «brick-and-mortar» стратегию: он пообещал 200 новых оффлайн-магазинов в ближайшие годы. А ещё в Нью-Йорке Casper управляет компанией Dreamery, где

Шопинг-привычки поколений Y и Z



Источники

1. The Cassandra Report, Gen Z-focused issue.
2. Accenture, Global consumer shopping survey, 2017.
3. Interactions, The next generation of retail.
4. Accenture, Research "Who are the millennial shoppers? And what do they really want?"
5. PBN ННК и MAGRAM MR, исследование-сравнение российских миллениалов (Y) и центениалов (Z), 2017.

18-02

Рисунок 2 – Шопинг-привычки поколений

Покупки: онлайн и офлайн

Поколение Z всегда знало мир с интернетом и мгновенным доступом к любым продуктам. Тем интереснее утверждения исследователей о том, что даже у центениалов онлайн-шоппинг иногда проигрывает реальному опыту.

80% представителей поколения Z не просто покупают в офлайн-магазинах, но с нетерпением ждут этого. 38% говорят, что в интернете сложно выбрать подходящий продукт среди аналогов, хотя найти их очень легко. Из-за этого молодое поколение любит покупать по рекомендации – друзей, лидеров мнений и звёзд. Сарафанное радио среди центениалов работает на 331% лучше простой рекламы в соцсетях. Это данные исследования UNiDAYS, проведённого в 2018 году. 8 из 10 покупают конкретный товар, потому что он понравился другу. Перед походом в магазин поколение Z просматривают отзывы, обзоры, стараются найти выгодную цену, промокоды и другие бонусы. Только после изучения интернет-источников они идут в офлайн-магазины, чтобы получить реальный опыт общения с продуктом.

35% центениалов чувствуют себя менее комфортно, чем старшие поколения, когда платят онлайн: они не отказываются от покупок в интернете полностью, но все чаще приходят в офлайн-магазины в ожидании индивидуального отношения и нестандартного взаимодействия с брендами. Прикоснуться и испытать продукт до покупки хочет $\frac{2}{3}$ представителей Z.

При этом, они менее капризны, чем миллениалы: 47% представителей поколения Z готовы ждать доставку до 7 дней, 53% готовы потратить до 30 минут, чтобы забрать покупку из офлайн-магазина. То есть, молодые спокойно инвестируют свои время и усилия, если считают результаты стоящими. Это резко контрастирует с миллениалами, которые предпочитают, чтобы покупка была простой: оплата – мгновенной, а доставка – быстрой.

Если обобщить всё сказанное выше, мы увидим, что молодые потребители ожидают от брендов сочетание реального опыта в магазине с удобством онлайн-покупок (рисунок 2). И бренды это понимают. Тем не менее, это сильно отличается от развивающейся сейчас «модели шоуруминга», когда потребитель сначала идет в традиционный магазин, чтобы посмотреть на товар, а потом покупает его в интернете, потому что там он часто бывает дешевле. Молодых людей уже не впечатляют известные марки и традиционные рекламные кампании. Они предпочитают опираться на мнения в этой самой среде – своих друзей или других потребителей.

Зеды получают информацию о брендах из интернета и социальных сетей: в информационном пространстве правит видеоконтент (рисунок 1). Видео передаёт больше информации, чем фото. Больше половины центениалов создают контент самостоятельно. Это подтверждают данные CommScore: самая привлекательная профессия для поколения Z – популярный видеоблогер. О YouTube-карьере мечтает 37% респондентов.

YouTube – ключевая платформа для поколения Z



Источники:

1. Pew Research Center, Survey "Teens, Social Media & Technology 2018".
2. CivicScience, "Millennials vs Gen Z".
3. Upfront Analytics, Marketing to Generation Z Teenagers.

Рисунок 1 – YouTube ключевая платформа для поколения Z

Но, в отличие от креативного поколения Y, поколение Z привыкло к интуитивным инструментам для решения творческих задач. Например, мгновенному монтажу видео на смартфоне.

За этой привычкой можно наблюдать прямо сейчас, на примере взрывного роста сервиса для обработки и обмена короткими мобильными видео TikTok: в конце 2018 года платформа опередила Instagram и Facebook, которые лидировали абсолютно безоговорочно последние годы. Причина – короткие вертикальные видео, челленджи, удобные инструменты для редактирования роликов, маски, фильтры, бесплатная фоновая музыка и новые форматы, которые отлично совпали с потребностями центениалов. Главными приложениями миллениалов, согласно отчету comScore, остаются Facebook, почтовый клиент Gmail и платформа для покупок Amazon.

При всём этом, центениалы не ценят финансовый достаток или уровень образования так, как ценности и интересы. Они видят мир вокруг себя и быстро узнают главное, потому что в интернете есть ответы почти на все возможные вопросы. Центениалы ещё больше ориентированы на собственное мнение. С детства они видят переменчивость мира, чувствуют ответственность перед будущими поколениями, принимают ответственность за свои действия и судьбу.

Поэтому высокой зарплате и быстрому карьерному росту предпочитают стабильную работу в компаниях с возвышенными ценностями.

Технозависимость

Мы замечаем, что оба поколения в высокой степени зависят от мобильных устройств и диджитал-сервисов.

53% миллениалов признаются: они скорее откажутся от обоняния, чем от современных технологий. 80% из них спят со смартфонами, 32% пользуются соцсетями даже в туалете. Данные по центениалам впечатляют не меньше: по информации Commscore, 100% представителей поколения Z проверяют смартфон хотя бы 5 раз за час, а 7 из 10 совершеннолетних зэдов делают это каждые 2 минуты.

Разделяет поколения то, что поражающие миллениалов «технологии будущего» для центениалов – обыденность: 82% опрошенных уверены, что прекрасно разбираются в инновациях. Их сложнее удивить: с детства центениалы знают о дополненной реальности, AI-ассистентах, беспилотных автомобилях. Опрос британского агентства Voxburner показал, что виртуальная реальность интересует более 71% центениалов против 58% у миллениалов, а этот вывод подтверждает исследовательская компания CivicScience. По её данным, купить VR-очки готовы 28% представителей поколения Z и лишь 19% – поколения Y.

Отношение к брендам

Центениалы хотят получать максимум информации о бренде и о товаре, который приобретают: они не воспринимают стандартные приёмы маркетинга, зато ценят искренний подход и честную рекламу – настоящие человеческие эмоции и истории, а не идеальные яркие картинки, обработанные фоторедакторами. Важен не столько сам продукт, сколько процесс покупки и инфраструктура бренда: доступ к сервисам после покупки, качество поддержки, имидж, каналы коммуникации с клиентом. В понимании центениалов лучшие продукты – это системы сервисов, объединяющие пользователей в комьюнити и позволяющие общаться, получать поддержку легко и обязательно онлайн.

Их вкусы и предпочтения продиктованы глобализацией и толерантностью. Интернет для них – повседневность, сообщества в онлайн и офлайн сливаются, а в сети разворачивается столько диалогов и чатов, что посчитать их становится просто непосильной задачей.

Если миллениалы озабочены личным счастьем и удовлетворением собственных желаний, центениалы считают себя ответственными гражданами Земли, частью планетарной экосистемы, чувствуют ответственность за её развитие и реально влияют на мир. В данных Ernst&Young отмечены несколько примеров поведения:

- дочь запрещает родителям покупать пластиковые бутылки с водой после того, как узнаёт о вреде пластика для экологии;
- подростки объясняют родителям, как сократить загрязнение и расход топлива, если больше ходить или ездить на велосипеде;
- девочки 9–10 лет вместо подарков на день рождения просят друзей перечислять любые суммы хосписам или организациям, поддерживающим безнадежно больных детей.

Всё это не про Грету Тунберг, но подростки, быстро познающие мир через интернет, реально влияют на мир. 90% родителей центениалов считаются с мнением детей при планировании покупки, особенно, если это – новый телевизор или смартфон. При том, что большая часть миллениалов не готова платить больше лишь за социальную ответственность компаний и старается оправдать высокую цену лучшим качеством или премиальностью бренда, представители поколения Z ждут реальных действий от брендов.

Возможности и угрозы современного мира сформировали у поколений Y и Z разный подход к жизни

FutureCast отмечено, что миллениалы следуют убеждению «я живу лишь один раз» и потому стараются получить от жизни максимум наслаждения. Ради впечатлений они готовы рисковать: 77% хотят пережить яркий опыт сильнее, чем приобрести желанный товар.

По данным опроса FutureCast, 60 % центениалов выбирают продукт вместо впечатления. Они практичны и хотят менять мир: 60% центениалов против 39% у миллениалов. При этом, поколение Z не просто мечтает, но и верит в свои силы, заявляя, что техническая подкованность делает их достойными иметь больше, чем у них есть. Центениалы ждут от брендов, коллег и подписчиков серьёзного отношения к своему мнению, помощи в достижении целей. Например, запуске бизнеса. Такое желание есть у 72% опрошенных FutureCast.

Агбозо Э., Ведерников Б.Б.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МИРОВОГО РЫНКА ПОД ВЛИЯНИЕМ ПОКОЛЕНИЙ Y И Z

Аннотация. Данная статья посвящена анализу мирового рынка, тенденций 2020 года. Рассмотрено влияние поколений на развитие рынка маркетинга, банков, ИТ-услуг. Оцениваются потенциальные сегменты бизнеса для инвестирования и выбора стратегий развития компании.

Ключевые слова: поколение Y, поколение Z, миллениалы, центениалы, тренды, соцсети, youtube, анализ рынка, экономика, цифровые технологии, интернет.

Abstract. This article is devoted to the analysis of the world market, trends in 2020. The influence of generations on the development of the market of marketing, banks, IT services is considered. Potential business segments for investing and choosing company development strategies.

Keywords: Generation Y, Generation Z, millennials, centennials, trends, social networks, youtube, market analysis, economics, digital technologies, the Internet.

Введение

Поколение Y или «миллениалов» отсчитывают с 1981 года. Эти люди стали совершеннолетними после 2000 года и, хотя детство они провели без гаджетов и соцсетей успели глубоко вовлечься в использование цифровых технологий во время становления интернета.

«Центениалы» – представители поколения Z – сильно отличаются от поколения Y: с младенчества они живут в мире доступных смартфонов, планшетов, быстрого интернета и всего, что он может предложить. Точкой отсчёта для этого поколения можно назвать 1995 год, так что старшим центениалам сегодня уже 24. Но важно знать, что у социологов нет одного мнения об их возрасте. Из-за разной скорости развития технологий в разных странах граница колеблется в пределах 1991–2001 г.г.

По данным медиакомпания Bloomberg, представители поколения Z составляют 32% мирового населения. Мировая демография такова, что это уже сейчас ненамного больше доли поколения Y (31,5%). При этом, по запасу платёжеспособности центениалы сильно впереди – они тратят больше и становятся нужными брендам. Это приводит к тому, что компании вынуждены учитывать запросы поколения двадцатилетних, их вкусы и предпочтения к контенту.

нм. Это близко, хотя и несколько больше значений, полученных в диффузионных и структурных исследованиях [6-7].

Заключение

Методами молекулярной статики проведен расчет структуры и энергии симметричных границ наклона $\langle 110 \rangle$ в поликристаллическом титане. Получены значения энергии и ширины границ для различных разориентировок наиболее устойчивых границ зерен. Показано, что рассчитанные значения энергии и ширины границ не противоречат эксперименту.

Благодарность

Авторы выражают признательность Ю.Н. Горностыреву и Л.Е.Карькиной за консультации и помощь в обсуждении результатов.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (тема «Функция» номер госрегистрации АААА-А19-119012990095-0).

Библиографический список

1. Plimpton S. Fast Parallel Algorithms for Short-Range Molecular Dynamics / S. Plimpton // Journal of Computational Physics. – 1995. – Vol. 117, Is. 1. – P. 1–19.
2. Hoover W. G. Canonical dynamics: Equilibrium phase-space distributions / W. G. Hoover // Physical Review A. – 1985. – Vol. 31, Is. 3. – P. 1695–1697.
3. Nosé S. A unified formulation of the constant temperature molecular dynamics methods / S. Nosé // Journal of Chemical Physics. – 1984. – Vol. 81, Is. 1. – P. 511–519.
4. Stukowski A. Visualization and analysis of atomistic simulation data with OVITO – the open visualization tool / A. Stukowski // Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering. – 2010. – Vol. 18, Is. 1. – P. 015012.
5. Mendelev M. I. Development of an interatomic potential for the simulation of defects, plasticity, and phase transformations in titanium / M. I. Mendelev, T. L. Underwood, G. J. Ackland // Journal of Computational Physics. – 2016. – Vol. 145, Is. 15. – P. 154102.
6. Grain boundary width, energy and self-diffusion in nickel: effect of material purity / D. Prokoshkina, V. A. Esin, G. Wilde, S. V. Divinski // Acta Materialia. – 2013. – Vol. 61, Is. 14. – P. 5188–5197.
7. Rösner H. Strain mapping along al-pb interfaces / H. Rösner, C. T. Koch, G. Wilde // Acta Materialia. – 2010. – Vol. 58, Is. 1. – P.162–172.
8. Measurement of the grain boundary energy of commercially-pure grade 2 titanium at high temperature / C. C. Camilo, E. C. Souza, P. L. Di Lorenzo, J. M. D. A. Rollo // Revista Brasileira de Engenharia Biomedica. – 2011. – Vol. 27, Is. 3. – P. 175–181.

Значительное число начальных конфигураций ГЗ деградировали при МД моделировании. Некоторые наиболее устойчивые конфигурации, полученные молекулярной статикой, представлены на рис. 3.

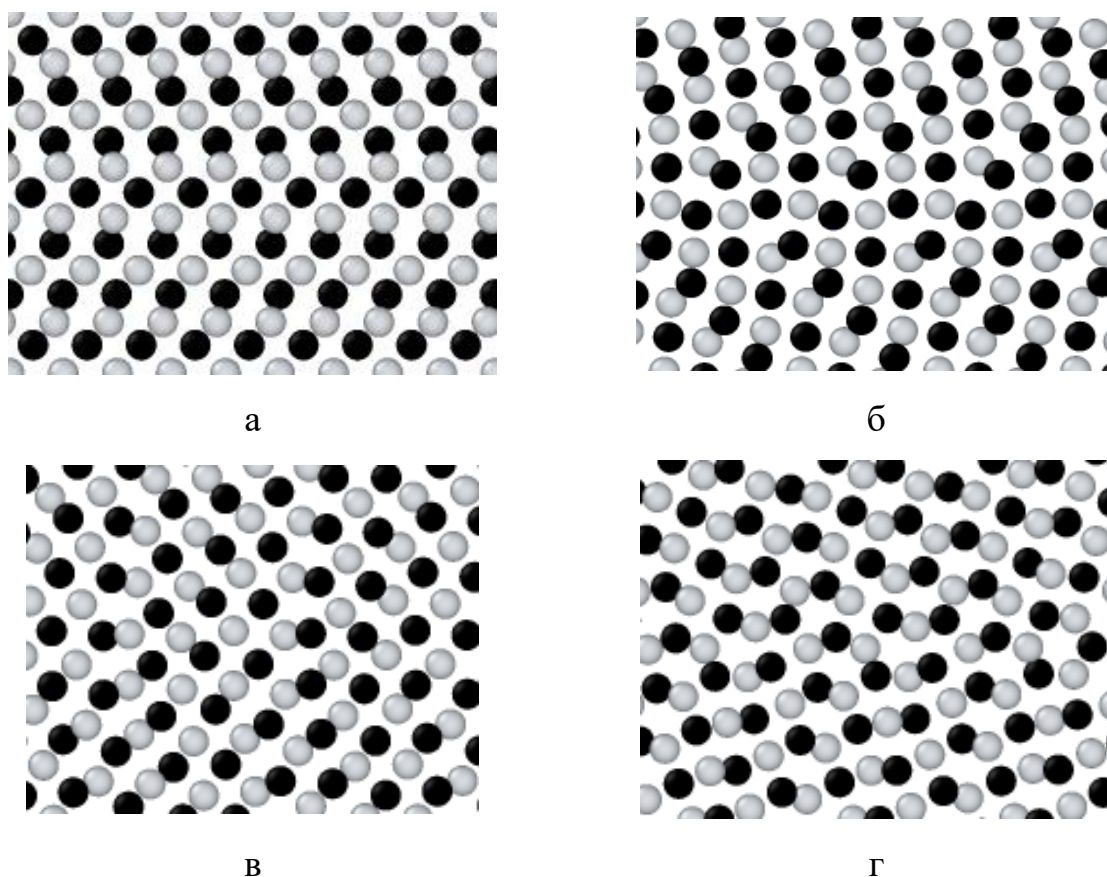


Рисунок 3 – Структуры границ $\Sigma 3$ (112) (а); $\Sigma 19$ (116)[1-10] (б); $\Sigma 17$ (223) (в); $\Sigma 17$ (334) (г), рассчитанные с помощью молекулярной статистики.

Сравнение результатов настоящего исследования с данными работы [8], в которой было проведено экспериментальное определение энергии границ зерен общего типа в ОЦК Ti при высоких температурах, показывает, что рассчитанные методом молекулярной статистики энергии специальных границ заметно ниже, чем было получено экспериментально для границ общего типа, хотя они одного порядка. Имеющееся расхождение, по-видимому, объясняется двумя причинами. Во-первых, энергия специальных границ всегда меньше, чем границ общего типа. Во-вторых, экспериментальное исследование было проведено для высоких температур, а расчет проводился для 0 К. С учетом этого согласие результатов расчета и эксперимента можно признать удовлетворительным.

В таблице 1 приведена оцененная ширина ГЗ, рассмотренных в настоящей работе. Для рассмотренных ГЗ расчетная ширина составляет 0.6-1.6

Таблица 7 – Параметры структуры, энергия и ширина ГЗ

\square	Плоскость границы	\square°	EGB, Дж/м ²	\square , нм
33	(118)	20.5	0.06	1.1
19	(116)	26.5	0.06	0.8
9	(114)	38.9	0,35	0.6
11	(113)	50.5	0,25	1.3
3	(112)	70.5	0,47	0.8
43	(335)	80.6	0.05	1.6
17	(223)	86.6	0,13	1.3
17	(334)	93.4	0,11	1.2
3	(111)	109.5	0,38	1.3

Структуры, полученные из МД моделирования, отличаются от структур полученных молекулярной статикой, за исключением $\Sigma 3$ (112). Это иллюстрирует рис. 2, на котором показано сравнение структур границ $\Sigma 3$ (112) и $\Sigma 27$ (552), полученных молекулярной статикой и молекулярной динамикой.

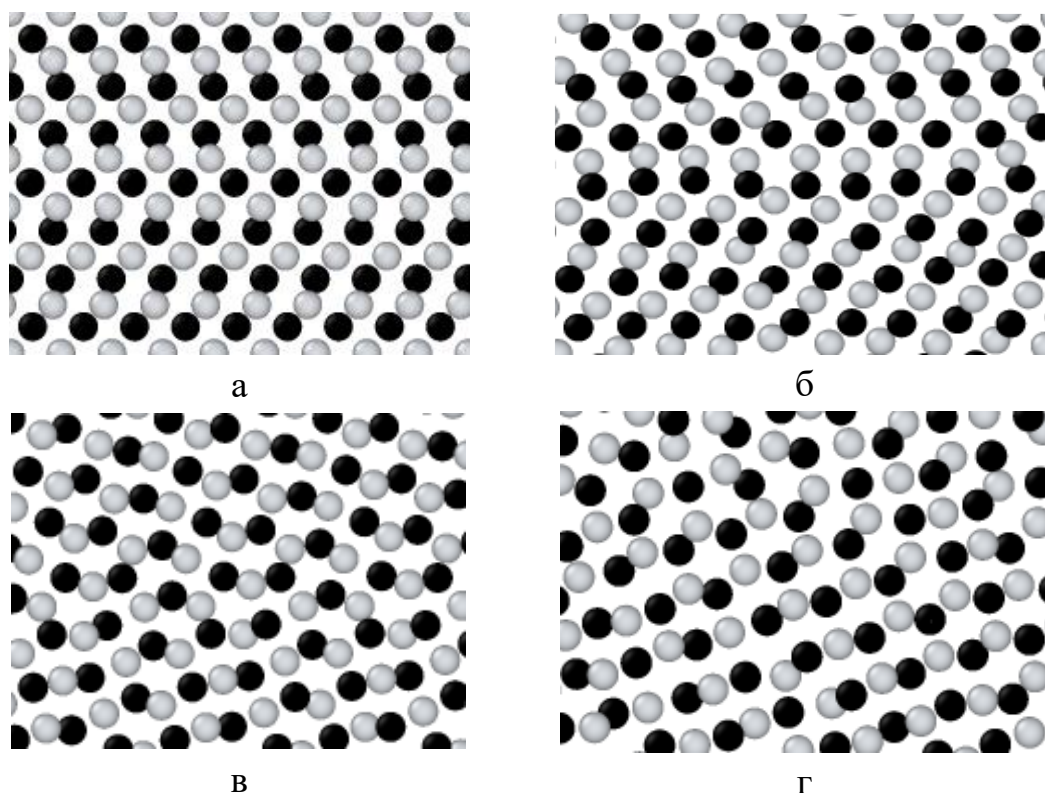


Рисунок 2 – Сравнение структур границ $\Sigma 3$ (112)[1-10] (а,б) и $\Sigma 27$ (552)[1-10] (в,г), рассчитанных с помощью молекулярных статики (а,в) и динамики (б,г).

близко друг к другу. Удаление атомов, расположенных слишком близко друг относительно друга проводилось с помощью определения критического расстояния между ними.

После удаления атомов в соответствии с критерием выполнялось редактирование геометрии блоков друг относительно друга. Тем самым задавались разные начальные конфигурации.

После этого запускалась процедура минимизации энергии в случае молекулярно-статического моделирования или пошаговая процедура в случае молекулярно-динамического моделирования. В случае МД моделирования использовался термостат Нозе-Гувера разработанный в работах [2-3].

Энергия границы зерна, EGB, определялась как избыточная энергия микроструктуры, локализованной в межзеренной области:

$$E_{GB} = (E_p - N \times E_{coh}) \times \frac{1}{2S} \quad (1)$$

где E_p – полная потенциальная энергия релаксированного бикристалла, N – число частиц, находящихся расчетной области, E_{coh} – энергия когезии (энергия связи, приходящаяся на один атом бездефектной решетки монокристалла), S – площадь границы зерна. Множитель 2 в знаменателе учитывает наличие двух границ.

Структура и энергия ГЗ для каждой границы рассчитывалась для различных начальных конфигураций. Для дальнейшего анализа использовалась структура, соответствующая минимуму энергии.

В работе также была оценена ширина границы зерна, поскольку она является важнейшим параметром зернограницной диффузии. В качестве визуализатора использовалась программа OVITO [4]. В программе OVITO было измерено максимальное расстояние между атомами по обе стороны границы, для которых межатомное расстояние, по крайней мере, в одном направлении существенно отличалось от межатомного расстояния в регулярной решетке. Это расстояние принималось за ширину ГЗ.

Результаты и обсуждение

Для поиска структур соответствующим реальным границам зерен необходимо из большого числа начальных конфигураций выбрать структуры с минимальной энергией. Увеличение числа начальных конфигураций, повышает вероятность найти структуру с наименьшей энергией. В таблице 1 приведены данные полученные из молекулярно-статического расчета.

молекулярной статик (MS) и для температуры 0 К, так и методом молекулярной динамики (MD) для температур, при которых стабильна ОЦК структура (>1155 К).

В работе [1] были разработаны потенциалы погруженного атома, зависящие от температуры, для Ti. Согласно [1] потенциал (Ti1) воспроизводит превращение ГПУ-ОЦК, температуру плавления и подходит для моделирования ОЦК-Ti. Этот потенциал мы использовали при расчетах.

Моделирование структуры и энергии границ зерен проводилось в программе LAMMPS [1]. Для этого использовалась расчетная ячейка с периодическими граничными условиями Борна – фон Кармана по всем трем направлениям, состоящая из двух зерен. В ячейке моделирования имеется две кристаллографически идентичных границы зерна: одна периодическая ГЗ в верхней и нижней границах ячейки моделирования (ГЗ1) и одна ГЗ в середине ячейки (ГЗ2) (рис. 1).

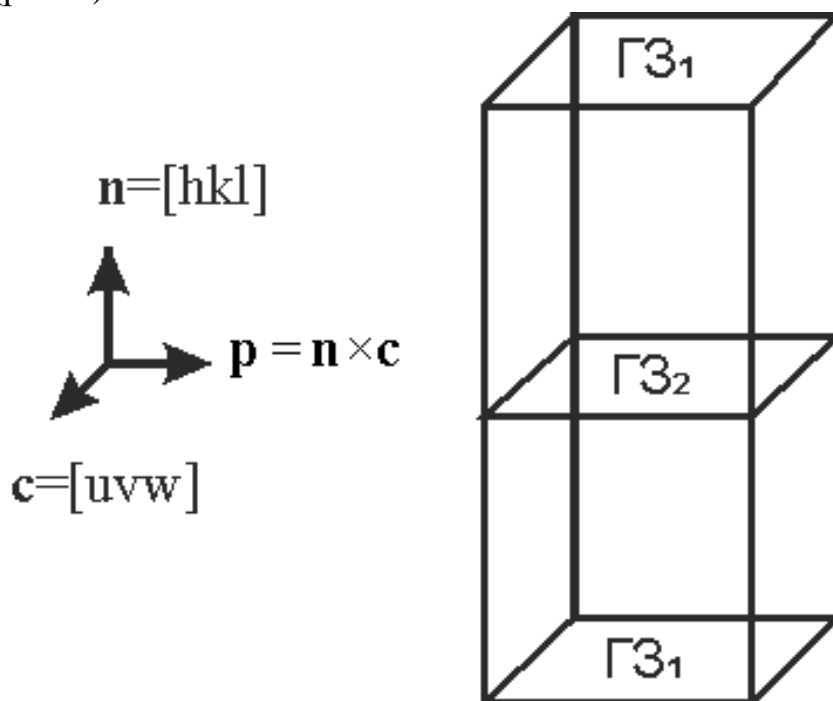


Рисунок 1 – Схема трехмерной периодической бикристаллической расчетной ячейки с обозначением ориентации кристалла. \mathbf{c} – ось наклона, \mathbf{n} – нормаль к плоскости границы

Компоненты направляющих векторов блоков определялись следующим образом. Один из векторов – это нормаль к плоскости границы зерна, \mathbf{n} . Два других вектора лежат в плоскости границы, один из которых – это вектор оси наклона, \mathbf{c} , а другой получается векторным произведением векторов нормали и оси наклона. Затем находили компоненты векторов второго блока.

На этапе построения границ зерен атомы достраивались до границы зерна, и соседние зерна могли содержать атомы, которые расположены очень

Уразалиев М.Г., Ступак М.Е., Попов В.В.

БОЛЬШЕУГЛОВЫЕ ГРАНИЦЫ ЗЕРЕН НАКЛОНА В ОЦК ТИТАНЕ: СТРУКТУРА, ЭНЕРГИЯ, ШИРИНА СПЕЦИАЛЬНЫХ ГРАНИЦ. МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.

Аннотация. Методами молекулярной статистики и молекулярной динамики выполнены расчеты структуры и энергии симметричных границ наклона в ОЦК титане. Проведено сравнение результатов расчетов структуры границ методами молекулярной статистики и молекулярной динамики. Выполнено сопоставление полученных в результате расчетов значений энергии и ширины границ в ОЦК Ti с имеющимися экспериментальными данными.

Ключевые слова: границы зерен, атомистическое моделирование, молекулярная динамика, молекулярная статика.

Abstract. Calculations of structure and energy of symmetrical tilt boundaries in BCC Ti have been done by the methods of molecular statistics and molecular dynamics. There results of calculations by both methods are compared. The calculated values of energy and width of boundaries in BCC Ti are compared with the available experimental data.

Keywords: grain boundaries, atomistic simulation, molecular statistics, molecular dynamics.

Введение

Свойства поликристаллических материалов во многом зависят от структуры и энергии границ зерен (ГЗ). В литературе мало данных о границах зерен в чистом ОЦК титане. Это связано с трудностями экспериментального исследования. Титан высокой чистоты имеет две аллотропические модификации: α и β . Температура фазового полиморфного превращения составляет 1155 К. Изучение границ зерен в β -Ti осложнено тем, что ОЦК структура не стабильна при комнатной температуре, а стабильна только при высоких температурах.

Поэтому для изучения границ зерен в ОЦК Ti предпочтительнее использовать атомистическое моделирование. В этой области научный прогресс зависит от прогресса в области компьютерных вычислений и разработки новых полуэмпирических потенциалов.

Целью настоящей работы было выполнить атомистическое моделирование структур специальных границ наклона с осью $\langle 110 \rangle$ в поликристаллическом β -Ti и оценить их энергии и ширину.

Методология атомистического моделирования

В настоящей работе были рассчитаны структуры и энергии симметричных границ наклона в поликристаллическом Ti. Расчеты проводились как методом

9. Mixed Oxide (MOX) Fuel // WNA : site. – 2017. – URL: <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/fuel-recycling/mixed-oxide-fuel-MOX.aspx> (accessed: 13.05.2020).
10. Пономарев-Степной Н. Н. Двухкомпонентная ядерная энергетическая система с замкнутым ядерным топливным циклом на основе БН и ВВЭР / Н. Н. Пономарев-Степной // Атомная энергия. – 2016. – Т. 120, № 4. – С. 183–190.
11. Oshkanov N. N. Evaluation of Input Start Time of Fast Reactors / N. N. Oshkanov, V. V. Maltsev // ISJAEE. – 2012. – Is. 4. – P. 60–61.
12. Oshkanov N. N. About two-component Atomic Energy / N. N. Oshkanov, V. V. Maltsev // ISJAEE. – 2012. – Is. 4. – P. 62–63.
13. Spinrad B. I. Self-Sustaining Systems of Reactors / B. I. Spinrad ; Ed. G. S. Bauer, A. McDonald. – Berlin : Springer, 1983. – 332 p.
14. Бекман И. Н. Плутоний / И. Н. Бекман. – Москва : Изд-во МГУ, 2010. – 166 с.

топливного цикла показало, что повторное производство переработанного топлива нарушит ядерную безопасность тепловых реакторов. Поэтому использование переработанного топлива в тепловых реакторах невозможно.

В данной работе предложена и обоснована схема совместной работы тепловых и быстрых реакторов с первичной загрузкой последних переработанным топливом из отработавшего топлива тепловых реакторов. В этой схеме тепловые реакторы поддерживают свою работу на урановом топливе, в то время как быстрые реакторы работают на переработанном топливе из отработавшего топлива тепловых реакторов и на своем собственном переработанном топливе. Тем самым решаются проблемы обращения с отработавшим топливом и самообеспечения топливом атомной энергетики. Мощности быстрых реакторов и их инфраструктура асимптотически увеличиваются до уровня самообеспечения топливом и обеспечивают первичную загрузку новых быстрых реакторов. После исчерпания ресурса урана или реакторов работа атомных электростанций с тепловыми реакторами может быть остановлена.

Чтобы определить возможную скорость ввода в эксплуатацию быстрых реакторов, выведено уравнение ядерно-физического баланса, которое связывает скорость ввода в эксплуатацию быстрых реакторов с доступной мощностью тепловых реакторов. Показано, что во всех странах с инфраструктурой переработки топлива возможно строительство быстрых реакторов.

Библиографический список.

1. Supply of Uranium // WNA : site. – 2019. – URL: <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/uranium-resources/supply-of-uranium.aspx> (accessed: 13.05.2020).
2. Nuclear Power Reactors in the World. 2019 Edition. – Vienna : IAEA, 2019. – 80 p.
3. Кесслер Г. Ядерные реакторы : пер. с англ. / Г. Кесслер. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. – 264 с.
4. Plutonium // WNA : site. – 2018. – URL: <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/fuel-recycling/plutonium.aspx> (accessed: 13.05.2020).
5. Ошканов Н. Н. Физические и технологические особенности ядерных реакторов на быстрых нейтронах / Н. Н. Ошканов. – Екатеринбург : Урал. ун-т, 2016. – 108 с.
6. Справочник по свойствам материалов для перспективных реакторных технологий / под ред. В. М. Поплавского. – Москва : ИздАТ, 2014. – 368 с.
7. Справочник по ядерной энерготехнологии / Ф. Ран, А. Адамантиадис, Дж. Кентон, Ч. Браун ; пер. с англ. под ред. В. Ф. Легасова. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 752 с.
8. Zaetta A. Why Fast Neutron Reactors? / A. Zaetta ; Ed. J. Guidez. – Sacle : CEA/Den, 2016. – 222 p.

1) Оценка имеющихся ресурсов природного урана и их однократное потребление реакторами показала, что истощение его ресурса можно прогнозировать через 80 лет. Это вряд ли это можно считать устойчивым состоянием ядерной энергетики. Многократное использование переработанного топлива теоретически может поднять степень использования урана в ТР. Однако, по условиям ядерной безопасности использование этого топлива ограничено однократной переработкой ОЯТ и 30%-загрузкой переработанного топлива от полного объема активной зоны ТР. Такое ограничение вызвано неудовлетворительными нейтронно-физическими характеристиками плутония-240, содержащегося в переработанном топливе ТР. Повышение кратности переработки ОЯТ и величины загрузки переработанного топлива требуют модернизации или изменения конструкции ТР.

2) Был получен неожиданный результат, что замкнутый ядерный топливный цикл возможен только для быстрых реакторов, поскольку многократная циркуляция делящихся материалов в замкнутом цикле приводит к недопустимому накоплению плутония-240 в тепловых реакторах. Это делает невозможным использование переработанного топлива из ОЯТ быстрых реакторов в тепловых реакторах по условиям ядерной безопасности. Поэтому необходимо изменить существующую стратегию самообеспечения топливом атомной энергетики.

3) Предложена схема совместной работы быстрых и тепловых реакторов, в которой осуществляется самообеспечение быстрых реакторов переработанным топливом. В этой схеме тепловые реакторы сохраняют свою работу на урановом топливе, а быстрые реакторы работают на топливе из отработавшего топлива тепловых реакторов и собственного переработанного топлива.

4) Выведена формула для расчета мощности тепловых реакторов, обеспечивающая изготовление первичной загрузки БР исходя из темпа их сооружения. Выведена формула для расчета требуемой мощности тепловых реакторов, из отработавшего топлива которых производится первичная загрузка новых быстрых реакторов. Результаты численного эксперимента подтверждают достаточность парка тепловых реакторов для первичной загрузки новых быстрых реакторов в странах с инфраструктурой переработки отработавшего топлива.

Заключение

Проведенная оценка располагаемых ресурсов природного урана показала, что они закончатся к концу 21 столетия. Исследование стратегии замкнутого

Как видно из Рисунка 1, доля выхода в ОЯТ ТР плутония составляет треть от трансмутированной массы (1 из 3 %), т.е. $K = 0,33$.

Изотопный состав плутония в ОЯТ ТР составляет [4]:

53 % Pu-239 + 25 % Pu-240 + 15 % Pu-241 + 5 % Pu-242 + 2 % Pu-238.

Сечения деления и поглощения изотопов определим в соответствии с библиотекой оцененных ядерных данных ENDF/B-VII.1 [6]. Соответственно, сечения поглощения и деления изотопов плутония ОЯТ ТР в тепловом спектре нейтронов составляют $\sigma_c^{39} = 309,3$ барн и $\sigma_f^{39} = 787,7$ барн; $\sigma_c^{40} = 295,4$ барн и $\sigma_f^{40} = 6,558_{-2}$ барн; $\sigma_c^{41} = 373,4$ барн и $\sigma_f^{41} = 1059$ барн; $\sigma_c^{42} = 21,43$ барн и $\sigma_f^{42} = 1,378_{-2}$ барн; $\sigma_c^{38} = 386,9$ барн и $\sigma_f^{38} = 16,67$ барн (индексы указывают на сокращенные атомные веса изотопов).

Суммарные сечения поглощения и деления плутония в ОЯТ ТР в соответствии с правилами суммирования сечений изотопов равны $\sigma_c^{Pu} = 322,1$ барн и $\sigma_f^{Pu} = 576,8$ барн. Соответственно, отношение сечений поглощения и деления ОЯТ ТР равно $\alpha = 0,558$.

Масса первичной загрузки плутонием реактора *PFBR* составляет 3034 кг. Примем $T = 1$ год. Тогда в соответствии с (1) суммарная тепловая мощность ТР для наработки первичной загрузки плутонием БР равна $P_{ТР} = 24,4$ ГВт.тепл. Т.к. ТР имеют в среднем КПД = 0,33 и коэффициент использования установленной мощности 0,8, то электрическая мощность энергоблоков с ТР составляет $P_{ТР}^{эл} = 10$ ГВт.эл.

Формула (1) может быть представлена в упрощенной форме для быстрой оценки возможной скорости ввода в эксплуатацию БР в соответствии с доступной мощностью ТР. Для этого в (1) подставляются определенные выше значения ядерно-физических характеристик, после чего:

$$M_{БР}/T(\text{кг/год}) \approx 0,3P_{ТР}^{эл}(\text{МВт.эл.})$$

Используем (2) для оценки возможности производства ОЯТ в странах, которые имеют инфраструктуру для переработки ОЯТ. Согласно [2], электрическая мощность блоков с ТР в этих странах составляет: Великобритания 8,9 ГВт, Россия 27 ГВт, Франция 63 ГВт, США 99 ГВт. Энергетический плутоний, накопленный в течение года в этих странах, составит 2,6 т, 8 т, 19 т, 30 т соответственно.

Результаты и обсуждение

При выполнении исследования были получены следующие основные результаты:

скоростью деления тяжелых ядер в реакторе, т.е. количеством делений ядер за время t (с). Оно равно

$$\frac{E}{\varepsilon t} = \frac{P}{\varepsilon},$$

где E – полная тепловая энергия, образующаяся при делении ядер (Дж); ε – энергия деления одного ядра (Дж); P – тепловая мощность реактора (Вт).

Соответственно, скорость расхода массы делящихся нуклидов (г/с) с учетом поглощения нейтронов топливом без его деления равна

$$\Delta M_- = \left(\frac{P}{\varepsilon}\right) \left(\frac{A}{N_A}\right) (1 + \alpha),$$

где A – атомная масса делящихся нуклидов; N_A – постоянная Авогадро (моль⁻¹); α – отношение нейтронных сечений поглощения σ_s и деления σ_f в данном топливе.

Одновременно с делением ядер в реакторе происходит наработка делящегося плутония-239 за счет трансмутации урана-238, скорость образования массы (г/с) которого равна

$$\Delta M_+ = C \Delta M_- = C \left(\frac{P}{\varepsilon}\right) \left(\frac{A}{N_A}\right) (1 + \alpha),$$

где C – коэффициент конверсии.

Таким образом, необходимая масса (г) ОЯТ ТР для первичной загрузки БР плутонием равна

$$M_{БР} = CK \left(\frac{P}{\varepsilon}\right) \left(\frac{A}{N_A}\right) (1 + \alpha) T$$

где K – коэффициент, учитывающий долю выхода в ОЯТ трансмутированного плутония, T – время наработки ОЯТ ТР (с), необходимое для изготовления МОКС-топлива для первичной загрузки БР. Соответственно, тепловая мощность ТР, необходимая для наработки ОЯТ, из которого будет изготавливаться топливо, равна

$$P_{ТР} = \frac{M_{БР} \varepsilon N_A}{CKA(1 + \alpha)T}$$

Численный эксперимент

Проведем численный эксперимент по определению скорости наработки массы плутония, обеспечивающей изготовление первичной загрузки БР плутониевым топливом на примере проекта Индийского быстрого реактора *PFBR*. Для этого реактора первичная загрузка требует величину энергетического плутония в ОЯТ ТР массой $M_{БР} = 3034$ кг [14].

плутония, источником которого является ОЯТ ТР. В БР нет существенных изменений состава плутония, потому что в отличие от ТР, в БР все изотопы плутония делятся и не имеют резонансов в сечениях деления и поглощения. Например, согласно проекту индийского быстрого реактора PFBR [14], изотопный состав изменяется в результате ежегодной эксплуатации реактора (в последовательности Pu-238-239-240-241-242) от [0,2-65,2-28-4,1-2,4]% до [0,2-55,5-29,4-4,3-2,5]%. То есть ОЯТ БР имеет состав энергетического плутония. Следует обратить внимание на сохранение плутония-240 в БР (даже относительное увеличение на 5%). При переработке ОЯТ он неотделим от плутония-239, т.е. при использовании ПТ в ТР, содержание плутония-240 увеличится примерно в 2 раза, что нарушает условия ядерной безопасности.

Таким образом, вариант замкнутого топливного цикла ЯЭС с взаимообменом ОЯТ между БР и ТР следует считать несостоятельным. Данный вывод является неожиданным и требует изменения стратегии взаимного обеспечения топливом БР и ТР, приведенной в [14].

Нами разработана схема реализации совместной работы БР и ТР (Рисунок 2б), отличающаяся от существующей стратегией работой ТР на урановом топливе в режиме выработки энергии и наработки ОЯТ ТР как источника изготовления топлива для первичной загрузки БР после их сооружения.

Как показано на Рисунке 2б, для предлагаемой стратегии топливо U для ТР изготавливается из природного урана и поступает в ТР. После его использования ОЯТ ТР поступает на изготовление МОКС-топлива для первичной загрузки БР. В последующем БР будут сами себя обеспечивать делящимися материалами по следующей схеме: после переработки ОЯТ БР изготавливается МОКС топливо для БР; после его использования ОЯТ БР поступает на изготовление нового МОКС топлива для БР и т.д. При наработке ОЯТ БР сверх самообеспечения топливом БР, оно направляется на первичную загрузку сооружаемых БР.

Определим мощность ТР, обеспечивающих БР загрузку топливом.

Мощность тепловых реакторов, обеспечивающая загрузку топливом быстрых реакторов

Обычно необходимость ввода БР рассматривается, исходя из ресурсов природного урана, и не затрагивает ядерно-физические связи в ЯЭС [11], [12]. В данной работе проводится оценка возможности обеспечения первичной загрузки топливом БР на основе ядерно-физических характеристик отработавшего топлива.

Для этого определим скорости расхода и наработки делящихся материалов в реакторе. Скорость расхода делящихся материалов определяется

- прекращение сооружения ТР и ввод замещающих их БР с набором мощности до необходимой величины к моменту окончания ресурса ТР [11]
- двухкомпонентная атомная энергетика с совместной работой БР и ТР, при которой урановое топливо в ТР по мере истощения ресурса урана заменяется на плутониевое, делящиеся элементы которого производятся в БР сверх своего потребления [12].

Первый вариант отпадает, т.к. при существующем темпе истощения ресурса ТР отсутствует резерв времени для создания инфраструктуры БР (переработка ОЯТ, изготовление топлива).

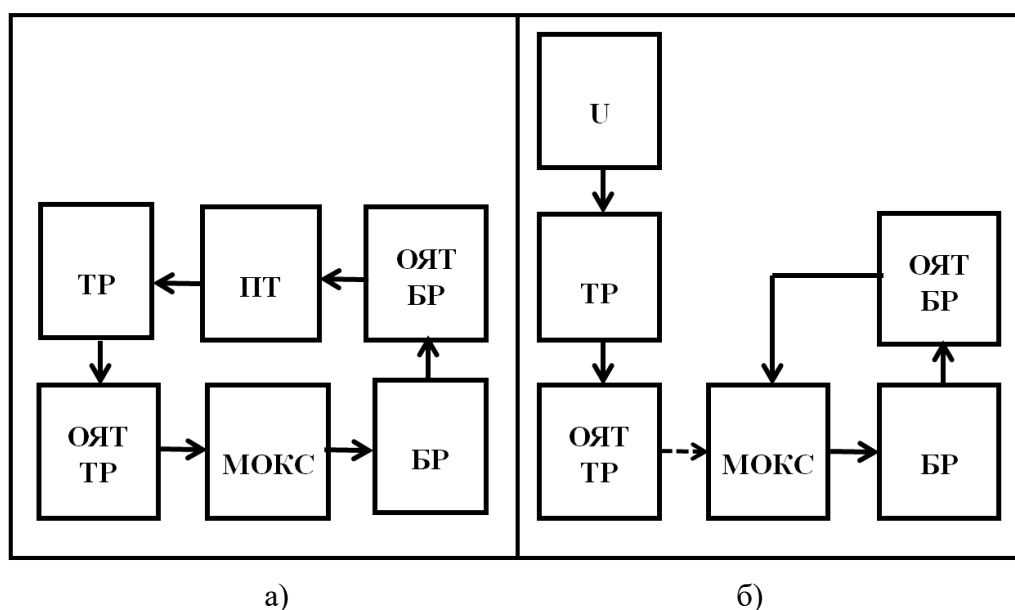


Рисунок 2 – Схема самообеспечения атомной энергетики в замкнутом цикле
а) существующая стратегия, б) предлагаемая стратегия (БР – быстрый реактор, МОКС – производство переработанного топлива БР, ОЯТ БР – переработка ОЯТ БР, ОЯТ ТР – переработка ОЯТ ТР, U – урановое топливо ТР, ПТ – производство переработанного топлива ТР, ТР – тепловой реактор).

Казалось бы, что второй вариант предпочтительнее, т.к. позволяет наращивать общую мощность системы за счет ввода БР и имеет резерв времени для создания инфраструктуры БР. Как видно из Рисунка 2а, в существующей стратегии замкнутого топливного цикла МОКС топливо БР изготавливается из ОЯТ ТР, а ОЯТ БР поступает на изготовление переработанного топлива (ПТ) для ТР. ОЯТ ТР поступает на изготовление МОКС-топлива БР.

Рассмотрим возможность использования ПТ в атомной энергетике. Как отмечалось выше, БР нечувствительны к изотопному составу энергетического

Методика исследования

Методика исследования основана на сопоставлении ядерно-физического баланса выгоревшего и наработанного количества делящихся элементов в реакторах и на этой основе установлении оптимальной модели использования топлива в ядерной энергетической системе.

Переработанное топливо с привлечением быстрых реакторов

Вспомним, что необходимость решения проблемы ресурса урана с помощью быстрых реакторов отмечалась задолго до сооружения первых АЭС. Еще в 1945 г. в США была разработана концепция БР, который нарабатывает делящиеся материалы выше собственного потребления путем трансмутации неделящегося в ТР урана-238 [7]. Наиболее эффективно это осуществляется при использовании плутониевого топлива. Плутоний отсутствует в природе, но образуется в любом реакторе, в топливе которого применяется уран-238 в качестве разбавителя делящихся материалов. Первоначальная загрузка БР плутониевым топливом, вследствие большей критической массы БР, возможна только на основе его извлечения из ОЯТ ТР, т.к. использование его из стратегических запасов является гипотетическим.

Однако, реализация указанной концепции до настоящего времени не осуществляется из-за медленного развития атомной энергетики и, как следствие, низких темпов потребления урана. В условиях отсутствия переработки ОЯТ ТР это привело к его постоянному накоплению, что создает проблему с его хранением. Ее можно решить с помощью БР, для первичной загрузки которого требуется большое количество плутония. Это возможно обеспечить за счет переработки ОЯТ ТР, решая тем самым обе проблемы – снижение объема ОЯТ ТР и работу реакторов на отсутствующем в природе плутонии.

БР обладают следующими преимуществами:

- нечувствительность к изотопному составу плутониевого топлива вследствие отсутствия резонансов нейтронных сечений в быстром спектре энергий (в ТР высокий пик сечения поглощения плутония-240 приводит к проблеме ядерной безопасности)
- полная загрузка переработанным топливом (для ТР только 30%)
- высокое выгорание топлива ($> 10\%$ тяжелых атомов против $< 5\%$ в ТР)
- наработка плутония выше собственного потребления, т.е. возможность самообеспечения топливом.

Рассмотрим отмеченные ранее основные варианты применения БР, снижающие зависимость атомной энергетики от урана:

Таким образом, в реакторе разделится 5 % тяжелых ядер. В отработавшее ядерное топливо (ОЯТ) ТР выгружается 2 % делящихся материалов (30 % от делящихся материалов в реакторе), 93 % практически неделящегося в тепловом спектре урана-238 и 5 % ПД.

В [5] показано, что максимальное использование ресурса ядерного топливного сырья равно $M = N(1 + C + C^2 + C^3 + \dots)$ (деление материала с концентрацией N , трансмутация воспроизводящего материала и деление трансмутированного материала), где C – коэффициент конверсии. При $C < 1$ приведенный выше ряд сходится и максимальное использование составляет

$$M = \frac{N}{1 - C}$$

Заметим, что полное использование достигается при $C = (1 - N)$. Природный уран содержит делящийся уран-235 в количестве 0,7204 % [6]), поэтому полное использование ресурса природного урана достигается при $C = 0,993$, который не может быть достигнут в ТР. В ТР при использовании уранового топлива $C \approx 0,6$ [7], поэтому максимальное использование ресурса природного урана с помощью ТР, не превышает $M_U = 1,8$ % (остальная часть «оседает» в ОЯТ). В примере Рисунка 1 показано, что при отсутствии переработки ОЯТ ТР используется только 5 % природного урана и, что важно, 93 % вкупе с 2 % делящихся материалов исключается из топливного цикла. Тем самым, максимальное использование природного урана в ТР снижается с 1,8 % до 0,1 %.

Многократное извлечение из ОЯТ ТР невыгоревших урана и плутония позволяет достичь использование природного урана в ТР предела 1,8 %. Однако, по условиям ядерной безопасности переработанное топливо (ПТ) можно загружать в ТР не более 30% объема активной зоны и нельзя использовать повторно переработанное топливо [8]. Увеличение загрузки ПТ до 50 % требует модернизации ТР, а для 100%-загрузки необходима новая конструкция ТР [9].

Целью настоящего исследования является установление условий использования переработанного топлива для самообеспечения топливом атомной энергетики.

Актуальность исследования определяется тем, что наряду с отложенной проблемой ресурса урана в отсутствие переработки возникла проблема накопления ОЯТ ТР, что становится обременительным и может привести к неконкурентоспособности атомной энергетики [10] и экологической опасности хранения ОЯТ, имеющего радиоактивность со сроком жизни несколько сот лет из-за содержащегося в нем плутония.

Введение

Жизненный цикл любой электростанции, работающей на невозобновляемом источнике топлива, напрямую зависит от его ресурса. Атомная энергетика не является исключением, поскольку мировые ресурсы природного урана имеют ограниченную величину $6,1 \times 10^6$ т [1]

Проведем оценку срока исчерпания ресурса природного урана для АЭС. По данным МАГАТЭ в мире по состоянию на 31.12.2018 эксплуатируется 448 энергоблоков АЭС с суммарной мощностью 396 ГВт.эл [без энергоблоков с быстрыми реакторами (БР)] [2]. Средневзвешенная потребность природного урана составляет примерно 190 т / ГВт.год [1], [3], т.е. для мировой атомной энергетике требуется 75240 т / год природного урана. При такой потребности ресурсов природного урана хватит примерно на 80 лет, что вряд ли можно считать устойчивым состоянием атомной энергетике.

Рассмотрим примерное выгорание уранового топлива в тепловом реакторе (ТР) (Рисунок 1). Оно содержит 4 % урана-235 и 96 % урана-238 [4]. Как видно из Рисунка 1, в течение топливной кампании разделится с образованием продуктов деления (ПД) 3 из 4 % урана-235 и 2 из 3 % плутония, который образовался в результате трансмутации урана-238.

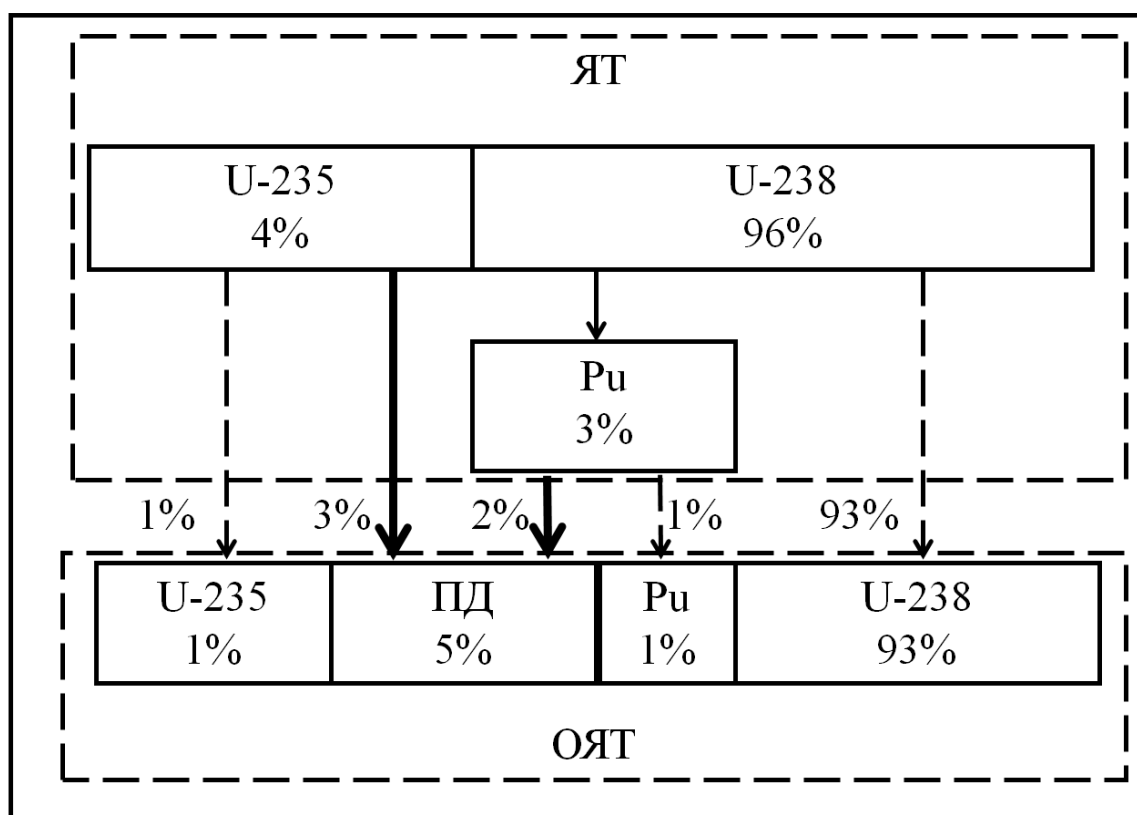


Рисунок 1 – Выгорание уранового топлива в ТР.

Тарасов А.Д., Смирных Н.В., Ошканов Н.Н.

ПЕРЕРАБОТАННОЕ ТОПЛИВО В ЯДЕРНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Аннотация. Целью исследования является установление условий использования переработанного топлива для самообеспечения топливом атомной энергетики. Актуальность определяется нарастающим объемом хранения отработавшего топлива (ОЯТ), что ведет к неконкурентоспособности АЭС. Методика исследования основана на сопоставлении ядерно-физического баланса выгоревшего и наработанного количества делящихся элементов в реакторах и на этой основе установлении оптимальной модели использования топлива в ядерной энергетической системе. Анализ ресурсов природного урана показал, что их хватит только на 80 лет работы АЭС. Использование в тепловых реакторах (ТР) рециклированного (переработанного) ОЯТ увеличивает этот срок, но в настоящее время не является целесообразным в связи с ограничениями по условиям ядерной безопасности однократной переработкой ОЯТ и ограниченной загрузкой переработанного топлива в ТР. Обоснован вывод о необходимости изменения стратегии замкнутого ядерного цикла, предусматривающую взаимное обеспечение делящимися материалами между БР и ТР. Разработана схема измененной стратегии совместной работы БР и ТР без использования ОЯТ БР в ТР из-за проблем ядерной безопасности ТР и выведена формула для определения мощности ТР для осуществления первичных загрузок топливом БР из делящихся материалов ОЯТ ТР. Эта схема асимптотически приводит к самообеспечению БР топливом и решает проблему управления обращением отработавшим топливом.

Ключевые слова: переработанное топливо, ресурсы урана, самообеспечение топливом, стратегия замкнутого топливного цикла, ядерная безопасность.

Abstract. The aim of the study is to establish the conditions for using of reprocessed fuel for self-sustaining in nuclear energy. Importance is determined by an accumulation of spent nuclear fuel (SNF) storage, which leads to the non-competitiveness of nuclear power plants and environmental hazards. The research methodology is based on a comparison of the nuclear-physical balance of the burned-out fissile elements in reactors and accumulated fissile elements in SNF and on this basis the establishment of an optimal model for the use of fuel in a nuclear power system. An analysis of natural uranium resource has shown that it will be enough only for 80 years of operation of nuclear power. The use of recycled (reprocessed) SNF in thermal reactors (TR) could increase this period, but at present it is not advisable due to restrictions on nuclear safety conditions by a single reprocessing of SNF and limited load of TRs. The conclusion about the need to change the closed nuclear cycle strategy, providing for the mutual provision of fissile materials between BRs and TRs, is substantiated. The scheme of the modified strategy for the joint work of BRs and TRs without using the SNF of the BRs in TRs is developed and a formula is derived for determining the power of TRs for the initial loading of a BR fuel from fissile materials of SNF of TRs. This scheme asymptotically leads to the BR self-sustaining with fuel and solves the problem of the SNF management.

Keywords: closed fuel cycle strategy, fuel self-sufficiency, nuclear safety, reprocessed fuel, uranium resources.

15. Robust trapping and manipulation of airborne particles with a bottle beam / V. G. Shvedov, C. Hnatovsky, A. V. Rode, W. Krolikowski // *Optics Express*. – 2011. – Vol. 19, Is. 18. – P. 17350–17356.
16. Generation of vector bottle beams with a uniaxial crystal / V. G. Shvedov, C. Hnatovsky, N. Shostka, W. Krolikowski // *Journal of the Optical Society of America B*. – 2013. – Vol. 30, Is. 1. – P. 1–6.
17. Fournier J.-M. R. Writing diffractive structures by optical trapping / J.-M. R. Fournier, M. M. Burns, J. A. Golovchenko // *Proceedings of SPIE. Practical Holography IX*. – 1995. – Vol. 2406, Is. 206208. – P. 101–111.
18. Design of bottle beam based on dual-beam for trapping particles in air / Z. Yang, Xinglei Lin, He Zhang [et al.] // *Applied Optics*. – 2019. – Vol. 58, Is. 10. – P. 2471–2480.
19. Porfirev A. P. Demonstration of a simple technique for controllable revolution of light-absorbing particles in air / A. P. Porfirev, A. B. Dubman, D. P. Porfiriev // *Optics Letters*. – 2020. – Vol. 45, Is. 6. – P. 1475–1478.
20. Ghebjagh S. G. Multifocal multi-value phase zone plate for 3D focusing / S. G. Ghebjagh, D. Fischer, S. Sinzinger // *Applied Optics*. – 2019. – Vol. 58, Is. 32. – P. 8943–8949.
21. Optical manipulation of particle ensembles in air / V. G. Shvedov, C. Hnatovsky, N. Shostka [et al.] // *Optics Letters*. – 2012. – Vol. 37, Is. 11. – P. 1934–1936.
22. Optical vault: A reconfigurable bottle beam based on conical refraction of light / A. Turpin, V. Shvedov, C. Hnatovsky [et al.] // *Optics Express*. – 2013. – Vol. 21, Is. 22. – P. 26335–26340.
23. Ivanov M. Beam propagation a uniaxial crystal under small angle to the optical axis and arrays of bottle beams / M. Ivanov, N. Shostka // *Proceedings of SPIE. Laser Beam Shaping XV*. – 2014. – Vol. 9194, Is. 91941C. – P. 1–10.
24. Pavani S. R. P. High-efficiency rotating point spread functions / S. R. P. Pavani, R. Piestun // *Optics Express*. – 2008. – Vol. 16, Is. 5. – P. 3484–3489.
25. Towards superresolution imaging with optical vortex scanning microscope / J. Masajada, A. Popiołek-Masajada, J. Masajada [et al.] // *Proceedings of SPIE. Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VIII*. – 2013. – Vol. 8788, Is. 87882V. – P. 1–10.
26. Analytical model of the optical vortex microscope / L. Plociniczak, A. Popiołek-Masajada, J. Masajada [et al.] // *Applied Optics*. – 2016. – Vol. 55, Is. 12. – P. 20–27.
27. Optical vortex phase determination for nanoscale imaging / B. Sokolenko, N. Shostka, O. Karakchieva [et al.] // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – Vol. 1062, Is. 1. – P. 1–10.

Библиографический список

1. Versatile optical manipulation system for inspection, laser processing, and isolation of individual living cells / B. Stuhmann, H. G. Jahnke, M. Schmidt [et al.] // *Review of Scientific Instruments*. – 2006. – Vol. 77, Is. 6. – P. 1–10.
2. Simpson S. H. Optical trapping of microrods: variation with size and refractive index / S. H. Simpson, H. Simon // *Journal of the Optical Society of America A*. – 2011. – Vol. 28, Is. 5. – P. 850–858.
3. Bhebbhe N. A. Generation of multiple vector beams using a single hologram / N. A. Bhebbhe, C. Rosales Guzman, A. Forbes // *Proceedings of SPIE. Laser Beam Shaping XVIII*. – 2018. – Vol. 10744. – P. 1074406.
4. A vector holographic optical trap / N. Bhebbhe, P. A. C. Williams, C. Rosales-Guzmán [et al.] // *Scientific Reports*. – 2018. – Vol. 8, Is. 17387. – P. 1–9.
5. Digital holography of optical-trapped aerosol particles / G. David, Kıvanç Esat, I. Ritsch, R. Signorell [et al.] // *Communication Chemistry*. – 2018. – Vol. 1, Is. 46. – P. 1–9.
6. A photophoretic-trap volumetric display / D. E. Smalley, E. Nygaard, K. Squire [et al.] // *Nature*. – 2018. – Vol. 553. – P. 486–490.
7. Kiselev A. D. Optical trapping by Laguerre-Gaussian beams: Far-field matching, equilibria, and dynamics / A. D. Kiselev, D. O. Plutenko // *Physical Review A*. – 2016. – Vol. 94, Is. 1. – P. 1–15.
8. Toward steering a jet of particles into an x-ray beam with optically induced forces / N. Eckerskom, R. Bowman, R. Kirian [et al.] // *Proceedings of SPIE. Optical Trapping and Optical Micromanipulation XII*. – 2015. – Vol. 9548, Is. 95480H. – P. 1–12.
9. Long-distance axial trapping with Laguerre-Gaussian beams / R. Dasgupta, R. Sh. Verma, S. Ahlawat [et al.] // *Applied Optics*. – 2011. – Vol. 50, Is. 10. – P. 1469–1476.
10. Optical macro-tweezers: Trapping of highly motile micro-organisms / G. Thalhammer, R. Steiger, S. Bernet, M. Ritsch-Marte // *Journal of Optics*. – 2011. – Vol. 13, Is. 4. – P. 1–7.
11. Banerjee A. G. Optical tweezer: autonomous robots for the manipulation of biological cells / A. G. Banerjee, S. Chowdhury, S. K. Gupta // *IEEE Robots & Automation Magazine*. – 2014. – Vol. 21, Is. 3. – P. 81–88.
12. The method of polarization filtering for implementation of the optical manipulator / N. V. Shostka, O. S. Karakchieva, B. V. Sokolenko, V. I. Shostka [et al.] // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2019. – Vol. 1400. – P. 066028.
13. Shostka N. Generation of the trapping light structures based on vector fields / N. Shostka, O. Karakchieva, B. V. Sokolenko // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – Vol. 1124, Is. 5. – P. 1–7.
14. Shostka N. V. Optical trapping and arrangement with reconfigurable “bottle” beam for digital holographic microscopy / N. V. Shostka, B. N. Sokolenko, O. S. Karakcheva [et al.] // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2019. – Vol. 1410. – P. 1–7.

На рисунке 3 (е – ж) представлены численно реконструированные изображения биообъектов из цифровой голограммы. Рисунки содержат изображения трёх диатомовых водорослей, захваченных лазерным «бутылочным» пучком. Кадрированные участки изображения размером 50×50 мкм были получены из оригинальной голограммы с размерами 4.30×3.50 мм. Скорость обработки голограммы составила 5 кадров в секунду, что позволяет наблюдать за движением частиц в реальном времени. Дальнейшее увеличение производительности системы возможно за счет параллельных вычислений на графическом процессоре персонального компьютера.

Заключение

В данном исследовании нами представлен анализ методов захвата объектов микронного размера с помощью оптической ловушки с настраиваемыми свойствами в реальном времени. Кроме того, помимо реализации оптического захвата, оптические манипуляции в пространстве в сочетании с цифровой голографической микроскопией позволяют изучать изолированные частицы и их ансамбли с высокой точностью контроля положения, формы и строения.

Управление симметрией поля пучка в области захвата определяет эффективность оптической ловушки, которая может использоваться для селективного захвата микрочастиц различной массы и формы. Цифровая голографическая микроскопия позволяет сканировать кювету на различной глубине пространства с помощью одной голографической картины и точно определять местоположение исследуемых образцов в оптической ловушке. Экспериментально возможно в реальном времени регистрировать эволюцию захваченных частиц в их естественной среде, объем которой не ограничен покровным стеклом, одновременно исследуя размеры и формы захваченных оптической ловушке биообъектов.

Благодарность

Данное исследование было поддержано Программой развития Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского на 2015 – 2024 годы (ВГ21 / 2019) при финансовой поддержке РФФИ и Совета Министров Республики Крым в соответствии с исследовательским проектом № 19-42-910010, а также стипендиальной программой Президента Российской Федерации для молодых ученых (СП-745.2019.4).

Схематическое изображение установки цифровой голографической микроскопии для более детальной проработки изображения захваченных частиц в пространстве кюветы представлено на рисунке 3 (д). Цифровое голографическое визирование построено по осевой схеме безлинзовой записи голограмм, включающих: когерентный источник света (диодный лазер 532 нм) сфокусирован на 25-миллиметровое отверстие диафрагмы. Возникающая расходящаяся сферическая волна освещает объект – кювету с образцом. Интерференционная картина в виде голограммы записывается на экране КМОП-камеры. Конус зелёного цвета с пунктирными линиями соответствует контрольной недифрагированной волне, а конус синего цвета – волна, рассеянная на микрочастице. Слой резко изображаемого пространства внутри кюветы расположен на расстоянии d от точечного отверстия и расстоянии z от образца до КМОП-матрицы, которой формируется изображение в градациях серого, используемое для дальнейших расчётов с помощью разработанного программного обеспечения, реализующего описанный ранее расчет дифракции. Увеличение в реконструированном изображении имело значение не менее $20\times$.

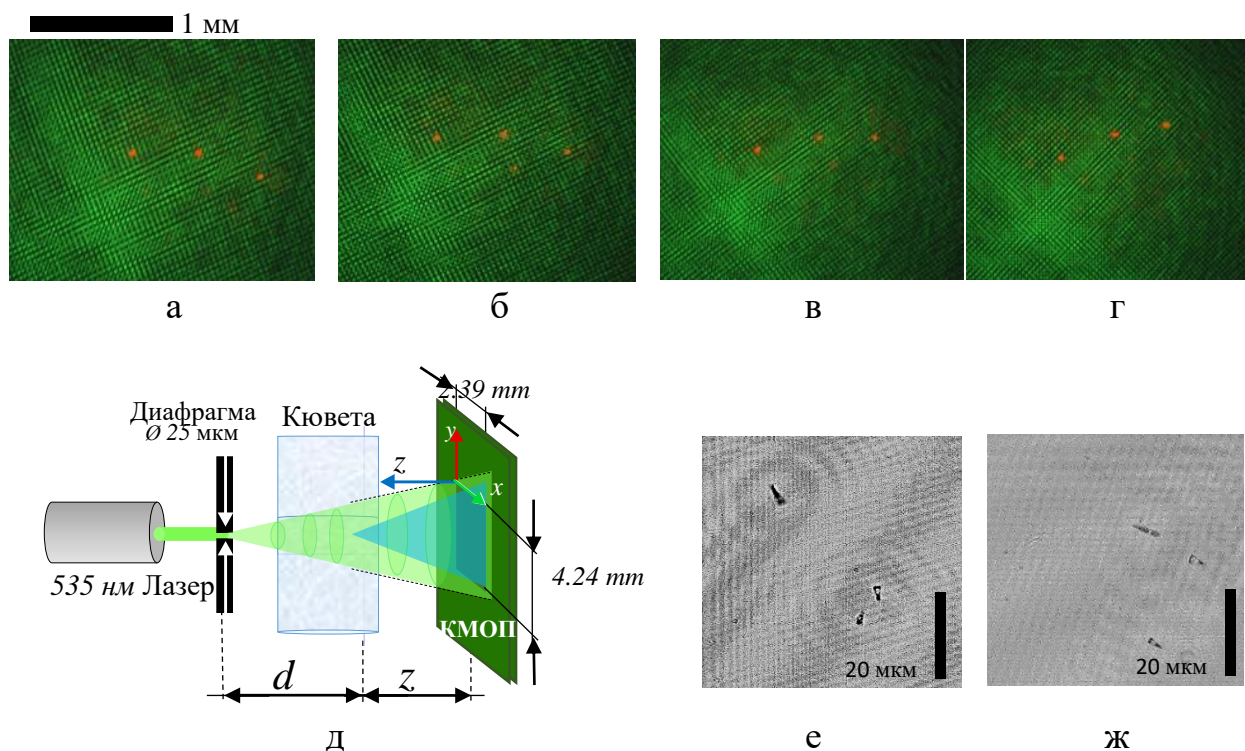


Рисунок 3 – Экспериментально полученные изображения нескольких микрочастиц, захваченной массивом «бутылочных» пучков в поперечной плоскости z . Другие параметры луча следующие: $\omega_0 = 200$ мкм, $z = 2$ см, $\lambda = 535$ нм. Каждый кадр (а – г) соответствует повороту амплитудной маски на угол 10° против часовой стрелки. Схема записи цифровой голограммы (д); восстановленные изображения микро фрагментов диатомовых водорослей, захваченных оптической ловушкой (е – г)

$$A(k_x, k_y) = F[E(\xi, \eta)] = \frac{1}{2\pi} \int \int_{-\infty}^{+\infty} d\eta d\xi E(\xi, \eta) \exp[-i(k_x \eta + k_y \xi)], \quad (3)$$

где волновой вектор $\mathbf{k} = (k_x, k_y, k_z)$, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, $k_x = k \frac{x}{z}$, $k_y = k \frac{y}{z}$, $k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2}$.

После распространения на расстояние z до плоскости изображения (x, y) , дифрагирующая волна приобретает дополнительную фазу $\exp(ik_z z)$ поэтому мы получаем амплитуду волны в плоскости (x, y) на расстоянии z :

$$E(x, y)_z = \frac{1}{2\pi} \int \int_{-\infty}^{+\infty} dk_x dk_y A(k_x, k_y) \exp[i(k_x x + k_y y + \sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2} z)]. \quad (4)$$

Теперь мы можем переписать уравнение (4) как двойное преобразование Фурье поля объекта $E(\xi, \eta)$:

$$E(x, y)_z = F^{-1} \left\{ F[E(\eta, \xi)] \times \exp(i \sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2} z) \right\}, \quad (5)$$

где $k_z = \sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2}$. В уравнениях (4) и (5) мы предполагали, что k_z является действительным, поэтому условие $k^2 \geq k_x^2 + k_y^2$ должно быть выполнено.

Интенсивность $I(x, y; z)$ и фазу $\varphi(x, y; z)$ восстановленных изображений можно получить из комплексной функции, описывающей напряженность поля $E(x, y)_z$ на расстоянии z с использованием следующих соотношений:

$$I(x, y; z) = |E(x, y)_z|^2, \quad (6)$$

$$\varphi(x, y; z) = \arctg \left\{ \frac{\text{Im}[E(x, y)_z]}{\text{Re}[E(x, y)_z]} \right\} = \arg[E(x, y)_z]. \quad (7)$$

Значения фазы $\varphi(x, y; z)$, полученные по уравнению (7), соответствуют модулю 2π . Любой из известных алгоритмов извлечения фазы может применяться для восстановления изображения и значений фазы, но мы ограничиваемся только описанием интенсивности поля $I(x, y; z)$.

Результаты и обсуждение

На рисунке 3 (а – г) показан экспериментальный процесс захвата микрочастиц морской биоты. Квазипериодическая структурированная ловушка была получена путём интерференции четырёх описанных выше гауссовых пучков. В качестве биологических объектов захвата использовались морские диатомовые водоросли. Частицы были захвачены в одной плоскости и подсвечены сверху. Последовательность изображений (а – г) соответствует различным углам ориентации частиц, управляемых вращением амплитудного экрана.

положения отдельных микрочастиц обеспечивался посредством осевой цифровой голографической микроскопией.

По своей природе, любая захваченная микрочастица является амплитудно-фазовым объектом, фазовые свойства которого определяются показателем преломления вещества, из которого она состоит. Использование цифровой голографической микроскопии в качестве инструмента, чувствительного к пространственным изменениям показателя преломления, делает его мощным решением для задачи визуализации микрообъектов. Цифровая голографическая микроскопия основана на интерференции двух когерентных или частично-когерентных световых пучков с разностью фаз [24]. Когерентные пучки в данном случае генерируются одним источником и разделяются делительной призмой [25, 26]. В схеме осевой цифровой голографии, применяемой в данном исследовании, точечный источник света используется для освещения образца, при этом суперпозиция волн, рассеянной микрочастицей и расходящейся опорной волны, которая проходит в свободном пространстве без дифракции, возникает на датчике камеры как это показано на рисунке 3 (д). Амплитуда поля полученной суперпозиций объектного и опорного пучков записывается в виде массива значений яркости в каждой точке для дальнейшей численной реконструкции. Полученная голограмма содержит информацию обо всей глубине поля захваченной области, и после реконструкции, амплитудные и фазовые компоненты доступны для анализа.

Для получения процесса записи цифровой голограммы исследуемого образца, в нашем случае – кювета с фрагментами морских диатомовых водорослей, плоскость визуализации объема жидкости располагается на расстоянии d от КМОП-камеры. Для извлечения данных о форме образца из объектной волны в цифровой голографии используется численный расчёт распространения оптического поля от плоскости голограммы к плоскости изображения.

Численное восстановление записанной в цифровом виде голограммы выполняется в соответствии со скалярной теорией дифракции в приближении Френеля для дифракционного интеграла Рэлея-Зоммерфельда. В нашем исследовании мы выбрали приближение углового спектра для восстановления голограммы в качестве метода, который не имеет ограничений по расстояниям z от образца до плоскости изображения, а также размер каждого пикселя восстановленного изображения соответствует размеру пикселя исходной голограммы [27]. ,

Поле $E(\xi, \eta)$ в плоскости голограммы ($z = 0$), имеет угловой спектр, определяемый посредством преобразования Фурье:

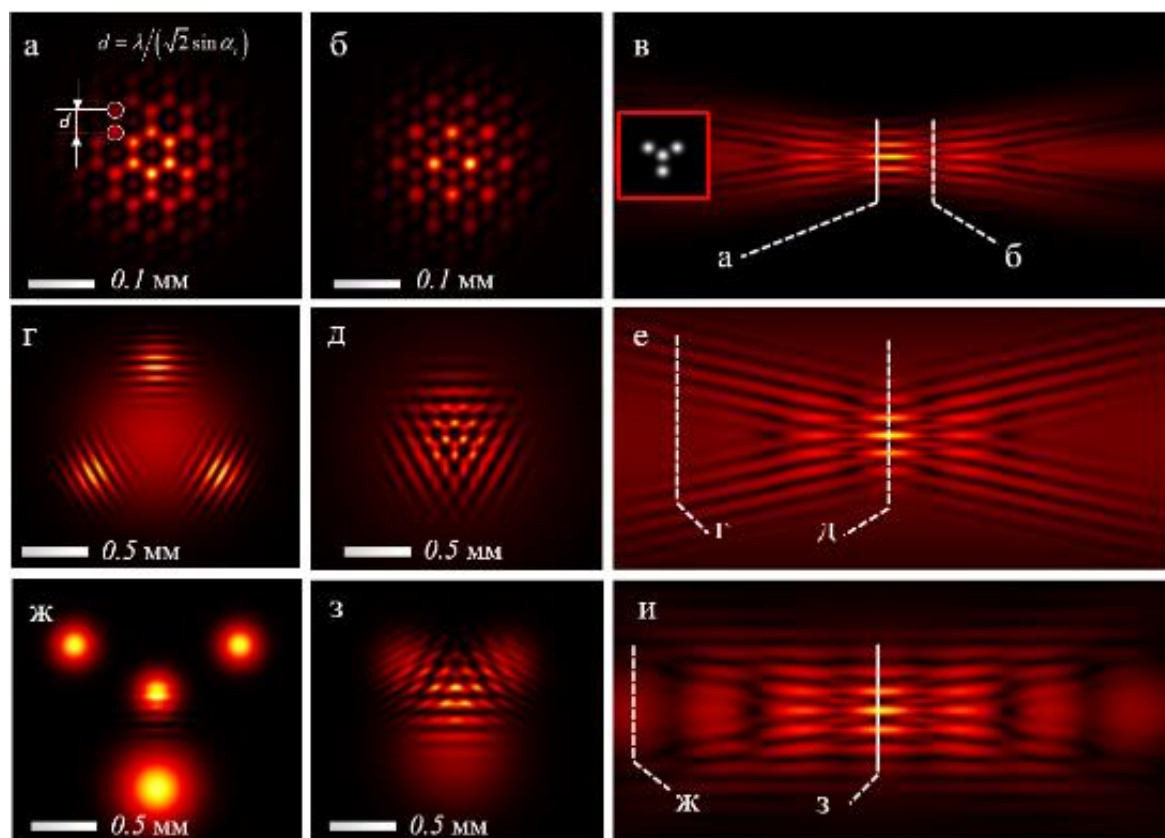


Рисунок 1 – Численно рассчитанные распределения интенсивности суперпозиции четырех пучков с равными углами наклона $\alpha = 3^\circ$ (а–и); различными радиусами перетяжки центрального (г–д) и периферического пучка (ж–и). Поперечные срезы взяты в указанных на фрагментах (в, е, и) плоскостях. Перетяжки пучков в плоскости $z = 0$ составляют 300 мкм и 500 мкм соответственно

Экспериментальное исследование процесса захвата проводилось с использованием полупроводникового лазерного источника мощностью оптического излучения 120 мВт на длине волны 535 нм. В качестве объектов, подверженных захвату, были взяты фрагменты морских диатомовых водорослей, линейные размеры данных биообъектов составляют 7-15 мкм, в видимом диапазоне света имеют высокое поглощение, в этой связи захват данных частиц осуществляется в минимум интенсивности оптической ловушки. Результат экспериментального захвата показан на рисунке 3 (а – г): для наблюдения положения частицы непосредственно в кювете и с помощью цифровой камеры с КМОП-структурой, область захвата дополнительно подсвечивалась красным, с длиной волны 650 нм, источником лазерного излучения мощностью 5 мВт. Вращением амплитудного экрана с заданным шагом и скоростью добивались одновременного поворота всех устойчиво захваченных частиц в ловушке. Дальнейшая визуализация и контроль

на величину r , таким образом вид преобразования наклона и поворота координат пучка запишется в виде: $\tilde{x} = (x + i\alpha z_0) \cos(\psi) + (y + r) \sin(\psi)$, $\tilde{y} = (i\alpha z - x + r) \sin(\psi) + y \cos(\psi)$.

Опишем гауссов пучок комплексной амплитудой вида:

$$\tilde{E}_{i,j}(\tilde{x}, \tilde{y}, z) = \frac{1}{1 - iz/z_0} \exp \left[-\frac{(\tilde{x}^2 + \tilde{y}^2)}{\omega_0^2 (1 - iz/z_0)} \right] \exp(-\alpha^2 k z_0), \quad (1)$$

По определению, распределение интенсивности поля интерферирующих волн вида $E = \tilde{E}(x, y, z) \exp(-ikz + i\varphi)$ описывается выражением:

$$I(X, Y, z) = \sum_{i=1}^N |E_i|^2 + \sum_{i \neq j}^N E_i E_j, \quad (2)$$

что представляет собой сумму квадратов амплитуд и интерференционные члены пар пучков с индексами i, j , которые в нашем случае меняются от 1 до N , где N – число пучков, амплитуда каждого из которых представлена выражением (1) и, в частном случае, может быть равной для всех пучков. Таким образом, геометрическая пространственная структура интерференционного поля будет описываться соответствующим набором параметров ψ , r и α отдельного пучка.

Результат численного моделирования процесса интерференции четырех гауссовых пучков, ориентированных под равными углами α к центральному пучку, распространяющемуся без наклона, представлен на рисунке 2 (г – и).

Состояние поляризации каждого из парциальных пучков для удобства будем считать линейной или циркулярной. Направление поворота вектора электрической напряженности при расчетах описывается выражением $E_{\pm} = E_x \mp iE_y$, где знак указывает на направление поворота: левое (+) и правое (–). Как показано на рисунке 2, изменение параметров отдельных пучков вдет к преобразованию результирующей интерференционной картины, что отражается на размере и положении минимумов интенсивности в пространстве.

Как следует из рисунка 1 (в), для получения картины суперпозиции четырех пучков, мы воспользовались амплитудным экраном с отверстиями разного диаметра, совокупность которых освещена предварительно расширенным пучком лазерного источника. Выбор фокусного расстояния линзы, расположенной за амплитудным экраном, позволяет обеспечить формирование пространственно-структурированных пучков в заданной области. Переключение состояния одновременно всех ловушек в пучке обеспечивается наличием центрального пучка, распространяющегося строго вдоль оси оптической системы. Ловушки становятся «открытыми» при перекрытии центрального пучка и наоборот: «закрытие» ловушки обеспечивается его вкладом в интерференционную картину.

результате суперпозиции гауссовых пучков, использовались ранее исключительно для захвата частиц диоксида кремния сферической формы в максимумах интенсивности. В результате были созданы оптические пинцеты для захвата ансамбля микрочастиц в определённой плоскости [19, 20]. Реализация пространственного захвата и управляемых манипуляций с массивом частиц, поглощающих световую энергию или с показателем преломления, меньшим, чем показатель преломления среды, в настоящий момент полностью не решена. Разработанный метод генерации пространственно-структурированных квазипериодических полей с использованием интерференции четырёх и пяти гауссовых пучков позволил создать необходимые условия для формирования участков поля с «бутылочной» структурой [21–23], а особенности управления такими ловушками являются предметом настоящего исследования.

Рассмотрим распространение монохроматического наклонного гауссового пучка с длиной волны λ под некоторым малым углом α к оси распространения z , как показано на рисунке 1 (в). также мы ограничимся параксиальным приближением, в следствие чего получим: $\sin \alpha \ll 1$, при этом $\cos \alpha \approx 1 - \alpha^2 / 2$. Введем преобразование координат наклонного пучка в плоскости xOz вида: $x' = x + i\alpha z_0$, а в плоскости yOz : $y' = y + i\alpha_0 z_0$, где $z_0 = k_0 \omega_0^2 / 2$, ω_0 – радиус перетяжки пучка Гаусса и (x, y) – координаты пучка в плоскости $z = 0$.

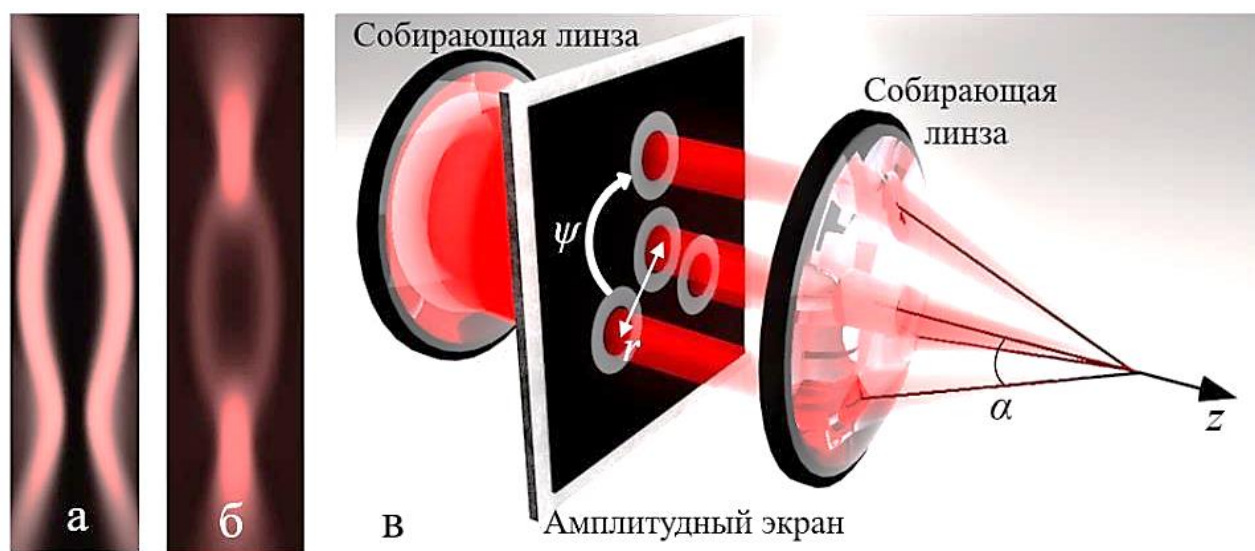


Рисунок 1 – Распределение интенсивности «бутылочного» пучка в продольном направлении оси z «открытого» (а) и «закрытого» (б) состояний; схематическое представление метода генерации «бутылочной» структуры (в)

Дополним преобразование поворота: пусть ψ – угол прецессии пучка вокруг оси z , и смещение оси произвольного пучка в поперечной плоскости $z = 0$

«открытого» в «закрытое» состояние, как показано на рисунке 1 (а) и (б) соответственно [18]. Дополнительным элементом управления формой «бутылочной» оптической ловушки является изменение угла наклона между осью пучка и оптической осью кристалла, что приводит к существенному преобразованию пространственного распределения поляризации результирующего поля и, как следствие, его интенсивности. В нашем предыдущем исследовании [14] мы проанализировали динамику расстояния между фокусами в зависимости от угла наклона α , в результате чего было показано, что, если угол наклона превышает 3,0 градуса, осесимметричная картина полностью разрушается, а захват возможен при углах наклона, меньше данного значения.

Произвольное смещение захваченной «бутылочным» пучком поглощающей частицы приводит к нагреву той её части, которая приводится в контакт с максимумом интенсивности. Результирующий перепад давления со стороны окружающей среды на область частицы, ближайшую к центру пучка и не подвергающуюся нагреву, и на более нагретой периферии возвращает частицу в положение устойчивого равновесия на оси «бутылочного» пучка. Применение системы линз с переменным фокусным расстоянием позволяет управлять положением области захвата в локализованном минимуме интенсивности, что обеспечивает полноценное трехмерное позиционирование захваченного микрообъекта. Характерным ограничением для оптических ловушек данного типа является сравнительно небольшое число независимых пучков, обеспечивающих захват отдельных частиц. В случае необходимости одновременного захвата и удержания микрочастиц в заданной плоскости продолжительное время, например, в системах «лаборатория-на-чипе», данный тип ловушек становится малоэффективным ввиду значительных потерь оптической мощности излучения на поляризационных элементах.

В основе нового подхода решения задачи увеличения числа одновременно действующих оптических ловушек посредством генерации квазипериодической структуры в поле пучка, обладающей всеми преимуществами «бутылочных» пучков, нами положен принцип интерференции нескольких когерентных лазерных пучков. Прежде было показано, что двухмерные световые квазипериодические структуры могут создаваться интерференцией трёх гауссовых пучков, сходящихся под разными углами. До того, как пространственные манипуляторы света получили широкое распространение, использование одно- и двумерных дифракционных решёток и интерферометров с независимыми пучками являлось самым простым способом создания квазипериодической сетки оптических ячеек [17, 18]. Поля, полученные в

захват частиц. Формирование ограниченной области оптической ловушки без световой энергии, симметрично окружённой максимумами интенсивности во всех трех направлениях, является актуальной задачей.

Данная статья организована следующим образом: в первой части нами описываются два основных метода формирования пространственных ловушек с помощью суперпозиции волновых полей. Первый метод использует поляризационную фильтрацию выходного векторного пучка после одноосного кристалла, а второй – суперпозицию нескольких лазерных пучков Гаусса, созданную с помощью амплитудного экрана. Во второй части демонстрируется возможность интегрированного бесконтактного захвата и визуализации биологических микрообъектов на основе осевой цифровой голографической микроскопии.

Материалы и методы исследования

Когерентные пучки, пространственное распределение интенсивности которых в поперечном и продольном сечении содержит чередующиеся максимумы и минимум, получили название «бутылочных» пучков [12-16]. Основой для формирования данной структуры является сингулярный пучок с минимумом интенсивности на оси пучка, окруженной ярким кольцом.

Один из способов создания пространственной структуры «бутылочного» пучка на практике основан на суперпозиции двух параксиальных гауссовых пучков с ортогональными поляризациями после двулучепреломляющего кристалла [12, 13]. В результате распространения сфокусированного гауссова пучка с круговой поляризацией через кристалл вдоль его оптической оси, результирующее поле является результатом сложения обыкновенной и необыкновенной волн, имеющих разные радиусы кривизны волнового фронта и равную интенсивность. При последующей фокусировке пучка, вышедшего из кристалла, в окрестности Фурье плоскости линзы на оси пучка образуются два максимума интенсивности: первый максимум соответствует фокусу обыкновенного пучка, а второй – фокусу необыкновенного пучка. Сложное пространственное распределение напряженности электромагнитного поля между фокусами [14] имеет вид известного «бутылочного» пучка с минимумом интенсивности на оси, равномерно окруженной областью в виде яркого кольца [15–17].

Поскольку результирующее поле имеет неоднородную векторную структуру в поперечном сечении, управление распределением интенсивности «бутылочного» пучка можно осуществлять с помощью поляризатора и четвертьволновой пластинки, что позволяет переключать ловушку из

ловушек на основе градиентных сил метод голографического воспроизведения на пространственных световых модуляторах (SLM) [3-5]. Основываясь на этом подходе, можно разделить один падающий когерентный пучок на несколько независимых пучков, используя дифракционные оптические элементы, структурная организация которых может быть динамической и статичной. Управление положением захваченных частиц пучков в динамической ловушке осуществляется благодаря проецированию на SLM или динамические микрозеркальные устройства (DMD) определенной дифракционной решетки, задающей отклонение пучков в ловушке. Отдельного внимания заслуживают стационарные способы управления положением частиц, такие как дифракционные решётки и амплитудные маски [3], применение которых обусловлено продолжительной стабильностью захвата, в том числе большого числа частиц (до нескольких десятков и сотен). Специфическое решение задачи создания динамических оптических ловушек было реализовано путем последовательного сканирования заданного числа положений лазерным лучом, отражающимся от зеркал гальвано-сканера, и формирования усреднённой по времени пространственной структуры света оптических пинцетов [1,6]. Для достижения устойчивого захвата частиц важно, чтобы градиент интенсивности в зоне фокусировки микро-объективом был максимальным, для этого исходный пучок, должен иметь достаточно большой диаметр, соразмерный со световым диаметром объектива.

Захват частиц, оптическая плотность которых меньше, чем у окружающей ее среды, как и в случае, если их поверхность является сильно поглощающей, а само тело – непрозрачным в рабочем диапазоне длин волн, производится в минимум интенсивности. Данный вид взаимодействия оптического излучения и вещества обеспечивается благодаря силам фотофорезиса, а пучки, предназначенные для захвата частиц вышеуказанного типа, должны иметь локальные минимумы интенсивности, симметрично окруженные яркими участками, например, кольцом света. В оптике такие пучки формируются за счет наличия фазовой неоднородности волнового фронта, называемой оптическим вихрем, а сами пучки получили название сингулярных [7,8]. Одиночные ловушки на основе таких пучков позволяют захватывать поглощающие частицы, а также объекты с полностью отражающей поверхностью.

Использование жидкокристаллических матриц SLM и дифракционных оптических элементов (DOE) для генерации некоторого количества таких пучков позволяет динамически реконфигурировать структуру массива для манипулирования захваченными объектами в режиме реального времени [9–11], однако данные методы не позволяют реализовать полноценный трехмерный

Соколенко Б.В., Шостка Н.В., Исмаилов И.А.,
Полетаев Д.А., Халилов С.И.

ОПТИЧЕСКИЙ ЗАХВАТ И МАНИПУЛИРОВАНИЕ БИОЛОГИЧЕСКИМИ МИКРОЧАСТИЦАМИ С ЦИФРОВЫМ ГОЛОГРАФИЧЕСКИМ ВИЗИРОВАНИЕМ

Аннотация. В данной работе проанализированы возможности бесконтактного удержания частиц микронного размера с использованием оптических ловушек, сформированных в пространственно-структурированном пучке. Генерация полей захвата обеспечивается посредством интерференции лазерных пучков с управляемыми параметрами, включая углы наклона, перетяжку, состояние поляризации и количество пучков. Визирование и отслеживание положения захваченных микрообъектов в трехмерном пространстве реализовано с помощью осевой безлинзовой цифровой голографической микроскопии с последующей компьютерной обработкой интерферограмм в режиме реального времени.

Ключевые слова: оптический захват, «бутылочные» пучки, цифровая голографическая микроскопия.

Abstract. In this paper, the possibilities of noncontact trapping of micron-sized particles using optical traps formed with spatially structured beam are assessed. Capturing fields are generated by interference of laser beams with controllable parameters, including tilt angles, beam waist, polarization states and a number of superposed beams. Visualization and tracking the position of trapped micro-objects in three-dimensional space is realized using axial lensless digital holographic microscopy with real-time computer processing of interferograms.

Keywords: optical trapping, “bottle” beams, digital holographic microscopy.

Введение

Оптический захват и бесконтактное управление положением микрочастиц в пространстве играет важную роль в современных научных исследованиях как в индустриально-технической, так и медико-биологической сферах. Выбор метода формирования световых пучков, содержащих массивы двух- и трёхмерных оптических ловушек определяется характером захватываемых объектов. Основное различие для, например, прозрачных тел состоит в отношении усредненного показателя преломления вещества частицы к показателю преломления среды, окружающей ее. Для случая, когда оптическая плотность частицы больше, чем у окружающей среды, например, жидкости или газа, захват производится в максимум интенсивности пучка, остро сфокусированного объективом с большой числовой апертурой, под воздействием градиентных сил и сил рассеяния [1,2]. Наиболее востребован сегодня для создания массива

Библиографический список

1. Платформа для обработки данных и машинного обучения Anaconda. – URL: <https://www.anaconda.com> (дата обращения 17.05.2020).
2. Гланц С. Медико-биологическая статистика : пер. с англ. / С. Гланц. – Москва : Практика, 1998. – 459 с.
3. Петров В. И. Медицина, основанная на доказательствах : учеб. пособие / В. И. Петров, С. В. Недогода. – Москва : ГЭОТАР-Медиа, 2009. – 144 с.
4. Гржибовский А. М. Анализ номинальных данных (независимые наблюдения) / А. М. Гржибовский // Экология человека. – 2008. – № 6. – С. 58–68.
5. Huan Liu. Chi2: feature selection and discretization of numeric attributes / Huan Liu, R. Setiono // Proceedings of 7th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence (Herndon, VA, USA, 1995). – Herndon : [s. n.], 1996. – P. 388–391.
6. Rothman K. J. A show of confidence / K. J. Rothman // The New England Journal of Medicine. – 1978. – Vol. 299, Is. 24. – P. 1362–1363.
7. Wilson E. B. Probable inference, the law of succession, and statistical inference / E. B. Wilson // Journal of American Statistical Association. – 1927. – Vol. 22, Is. 158. – P. 209 – 212.
8. Гржибовский А. М. Доверительные интервалы для частот и долей / А. М. Гржибовский // Экология человека. – 2008. – № 5. – С. 57–60.

Таблица 4 – Значение критерия Крамера для значимых корреляций

№	значимые корреляции	Критерий Крамера
1	внематочная беременность – плановое кс	0,1478
2	поздний самопроизвольный выкидыш – прерывание	0,2564
3	поздний самопроизвольный выкидыш – ранние роды	0,12
4	поздний самопроизвольный выкидыш – срочные роды	0,1678
5	преждевременные роды – P25.3	0,1512
6	регрессирующая беременность – P20.0, P20.1, P20.9	0,1157
7	самопроизвольный выкидыш в малом сроке – прерывание	0,2449
8	самостоятельные срочные роды – самостоятельные роды	0,1903
9	срочные оперативные роды – плановое кс	0,245
10	срочные оперативные роды – самостоятельные роды	0,2163

Заключение

Была обнаружена корреляционная зависимость между наличием выкидыша в анамнезе и прерыванием, сроком родов в текущей беременности. Есть связь между способом родоразрешения в анамнезе и в текущей беременности, внематочной беременностью в анамнезе с плановым кесаревым сечением в текущей. Наличие регрессирующей беременности в анамнезе влияет на наличие внутриутробной гипоксии плода (P20), преждевременные роды в анамнезе – на диагноз P25.3 (пневмоперикард, возникший в перинатальном периоде). Значимые признаки ($p < 0,05$) в дальнейшем будут использованы для построения прогностической модели вероятности появления отклонений в здоровье ребенка.

Благодарность

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-37-90121.

Таблица 3 – Интервальная оценка долей и p-value Z-критерия для разности двух долей

№	значимые корреляции	интервальная оценка долей	Z-критерий для разности двух долей (p-value)
1	внематочная беременность – плановое кс	(0,1914 ; 0,3704) (0,1006 ; 0,1869)	0,0040
2	поздний самопроизвольный выкидыш – прерывание	(0,0731 ; 0,3852) (0,0032 ; 0,0275)	4,07e-08
3	поздний самопроизвольный выкидыш – ранние роды	(0,0374 ; 0,3788) (0,0066 ; 0,0357)	0,0017
4	поздний самопроизвольный выкидыш – срочные роды	(0,0007 ; 0,0227) (0,0302 ; 0,1351)	0,0004
5	преждевременные роды – P25.3	(0,2065 ; 1,0) (0,0141 ; 0,05)	9,72*10 ^{-*}
6	регрессирующая беременность – P20.0, P20.1, P20.9	(0,2307 ; 0,8824) (0,1158 ; 0,1925)	0,0060
7	самопроизвольный выкидыш в малом сроке – прерывание	(0,2326 ; 0,6127) (0,0568 ; 0,1178)	1,15*10 ⁻⁶
8	самостоятельные срочные роды – самостоятельные роды	(0,2088 ; 0,3644) (0,0847 ; 0,1728)	0,0003
9	срочные оперативные роды – плановое кс	(0,1454 ; 0,3121) (0,0281 ; 0,0833)	2,44*10 ⁻⁶
10	срочные оперативные роды – самостоятельные роды	(0,0014 ; 0,0439) (0,1045 ; 0,1992)	3,05*10 ⁻⁵

В обнаруженных 10 корреляциях имелись 7 значимых факторов, влияющих на 5 различных показателей результата беременности и 2 показателя здоровья новорожденного. Согласно значениям V Крамера (Таблица 4), среднюю силу связи имеют зависимости между выкидышами в анамнезе и прерыванием текущей беременности, кесаревым сечением в анамнезе и способом родоразрешения в текущей беременности (плановое кс/самостоятельные роды). Остальные связи слабые.

не отличается от выборки, в которой у женщин этого признака нет. Уровень значимости принимался равным 0,05.

Значимыми приняты корреляции, отобранные с помощью всех трех подходов.

Для оценки силы связи отобранных пар «признак» – «исход» использовался критерий V Крамера, вычисляемый по формуле [4]:

$$V = \sqrt{\frac{\chi^2}{n(r-1)(c-1)}} \quad (7)$$

В формуле (7) r – число строк, c – число столбцов в таблице сопряженности.

Интерпретация значений V Крамера осуществлялась согласно рекомендациям Rea & Parker [4].

Результаты и обсуждение

Результатом проведенного исследования стало обнаружение 10 значимых корреляций (Таблица 3, Таблица 4).

Таблица 3 – P-value непараметрических критериев для значимых корреляций

№	значимые корреляции	непараметрические критерии	
		p-value	использованный критерий
3	внематочная беременность – плановое кс	0,0040	критерий согласия хи-квадрат
2	поздний самопроизвольный выкидыш – прерывание	0,0004	точный критерий Фишера
7	поздний самопроизвольный выкидыш – ранние роды	0,0340	точный критерий Фишера
8	поздний самопроизвольный выкидыш – срочные роды	0,0019	точный критерий Фишера
10	преждевременные роды – P25.3	0,0296	точный критерий Фишера
9	регрессирующая беременность – P20.0, P20.1, P20.9	0,0290	точный критерий Фишера
1	самопроизвольный выкидыш в малом сроке – прерывание	$1,15 \cdot 10^{-6}$	критерий согласия хи-квадрат
5	самостоятельные срочные роды – самостоятельные роды	0,0003	критерий согласия хи-квадрат
4	срочные оперативные роды – плановое кс	$2,44 \cdot 10^{-6}$	критерий согласия хи-квадрат
6	срочные оперативные роды – самостоятельные роды	$4,2 \cdot 10^{-6}$	точный критерий Фишера

отбора признаков достаточно разделить данные на две группы: первую будут составлять образцы, у которых признак присутствует, вторую – образцы с отсутствующим признаком. Далее строятся доверительные интервалы для каждой выборки (чаще 95% ДИ). В случае их не пересечения, можно сделать вывод о том, что выборки различны, то есть признак значим. В случае малых выборок используются доверительные интервалы для доли. Формула вычисления 95% ДИ для доли в случае бинарных выборок [2]:

$$\bar{p}_n - 2\sqrt{\frac{\bar{p}_n(1-\bar{p}_n)}{n}} \leq p \leq \bar{p}_n + 2\sqrt{\frac{\bar{p}_n(1-\bar{p}_n)}{n}} \quad (4)$$

где p – значение параметра выборки, \bar{p}_n – выборочное среднее, n – число элементов в выборках.

Для проведения текущего анализа имелись выборки малого объема с преобладанием нулей, поэтому для построения интервальной оценки доли использовался метод Уилсона. 95 % доверительный интервал по формуле Уилсона вычисляется следующим образом [7, 8]:

$$\frac{p + \frac{1,96^2}{2N} - 1,96\sqrt{\frac{p(1-p)}{N} + \frac{1,96^2}{4N^2}}}{1 + \frac{1,96^2}{N}} \quad (5)$$

где $Z_{1-\frac{\alpha}{2}}$ равно 1,96 при расчете 95% ДИ, N – количество наблюдений, p – частота встречаемости признака в выборке.

3. Z-критерий для разности двух долей.

Проверяет справедливость нулевой гипотезы о равенстве выборок. Это можно делать для любой двусторонней или односторонней альтернативы. Выборки, представляющие собой данные, разделенные по наличию признака, значимость которого проверяем, в случае нашей задачи независимы. Для расчета выборочных средних используется только первая строка таблицы сопряженности (количество единиц в первой и во второй выборках деленное на числе элементов в выборках), статистика выглядит следующим образом [2]:

$$Z(X_1^{n_1}, X_2^{n_2}) = \frac{\bar{p}_1 - \bar{p}_2}{\sqrt{P(1-P)(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2})}} \quad \text{где} \quad P = \frac{\bar{p}_1 n_1 + \bar{p}_2 n_2}{n_1 + n_2} \quad (6)$$

где X_n – выборки, p – выборочное среднее, n – число элементов в выборках.

Нулевые гипотезы для каждого признака и исхода были построены по следующему принципу: выборка, в которой у женщины есть текущий признак,

Корреляция оценивалась на уровне значимости 0,05.

Точный критерий Фишера основан на исчерпывающем поиске всех возможных вариантов заполнения таблицы сопряженности для заданного числа групп, поэтому он обычно используется для выборок малого объема и дает более точную оценку, чем хи-квадрат Пирсона, который сравнивает реальные и ожидаемые частоты появления признака [2, 4, 5]:

$$\chi^2 = \sum \frac{(O - E)^2}{E} \quad 1)$$

В формуле (1) O – наблюдаемое число в ячейке таблицы сопряженности, E – ожидаемое число в той же ячейке. Для таблиц 2×2 критерий хи-квадрат может чаще отклонять нулевую гипотезу, чем это должно быть из-за непрерывности теоретического распределения и дискретности действительного, поэтому имеет смысл применять коррекцию Йетса (поправку на непрерывность) для небольшого числа значений в таблице сопряженности [2]. Формула для расчета критерия хи-квадрат с использованием поправки Йетса имеет вид [2, 4]:

$$\chi^2 = \sum \frac{(|O - E| - \frac{1}{2})^2}{E} \quad (2)$$

Более того, хи-квадрат Пирсона неприменим, когда значение любой из клеток таблицы сопряженности меньше пяти. Критерий Фишера, в отличие от хи-квадрат Пирсона имеет односторонний вариант. Формула для вычисления двустороннего критерия, использованного в исследовании:

$$P = \frac{\frac{R_1!R_2!C_1!C_2!}{N!}}{O_{11}!O_{12}!O_{21}!O_{22}!} \quad (3)$$

R_1 и R_2 – суммы по строкам таблицы сопряженности, C_1 и C_2 – суммы по столбцам, O_{11} , O_{12} , O_{21} , O_{22} – числа в клетках таблицы, N – общее число наблюдений. Далее нужно рассчитать вероятности всех возможных таблиц, построенных при тех же суммах по строкам и столбцам, и просуммировать вероятность исходной таблицы с вероятностями не превосходящими ее. Полученное значение P – величина вероятности для двустороннего варианта критерия.

2. Доверительные интервалы.

Доверительный интервал (ДИ) – характеристика, позволяющая не только понять, есть ли различия, но и установить их величину. Есть мнение, что они лучше справляются с задачами нахождения различий между группами [6]. Для

Таблица 2 – Признаки из акушерского анамнеза женщин, использованные для анализа

№	Признаки из акушерского анамнеза женщины
1	аборт до 12 недель
2	внематочная беременность
3	индуцированный поздний выкидыш
4	кесарево сечение
5	не было беременностей
6	поздний самопроизвольный выкидыш
7	преждевременные роды
8	регрессирующая беременность
9	самопроизвольный выкидыш в малом сроке
10	самостоятельные роды
11	срочные роды

Для поиска значимых признаков применялись несколько методов:

1. Корреляционный анализ при помощи непараметрических критериев

Позволяет обнаружить статистически значимую связь между признаком и целевой переменной с помощью коэффициента корреляции [2, 3]. Данный коэффициент выбирается с учетом имеющейся задачи. Подход строится на обнаружении признаков, коррелирующих с целевой переменной, но не коррелирующих друг с другом. Для поиска связи между двумя независимыми категориальными или бинарными переменными используются таблицы сопряженности.

После построения таблицы сопряженности для текущего признака и исхода, выбор критерия для поиска корреляции происходил по следующему алгоритму:

- Если в таблице сопряженности есть хотя бы одно низкочастотное событие (встречается реже 5 раз):

Применение точного критерия Фишера для поиска корреляции текущего признака и исхода.

- Иначе:

- Если в таблице хотя бы одно событие встречается реже 10 раз:

Применение критерия согласия хи-квадрат (критерий согласия Пирсона) с коррекцией Йетса для поиска корреляции текущего признака и исхода.

- Иначе:

Применение критерия согласия хи-квадрат (критерий согласия Пирсона) для поиска корреляции текущего признака и исхода.

анализа использовались акушерский анамнез и результаты беременности 338 женщин и данные о состоянии здоровья их 402 детей. В качестве исходов выбраны сроки и способы родоразрешения, а также диагнозы детей на этапе родильного дома. Исход беременности и здоровье ребенка на этапе родильного дома описывался в виде 36 бинарных откликов (Таблица 1), данные акушерского анамнеза женщины были представлены с помощью 11 бинарных признаков (Таблица 2). Вычисления выполнены с использованием Python 3.6 в дистрибутиве Anaconda [1].

Таблица 1 – Исходы беременности и данные о здоровье детей после родов, использованные для анализа

№	Исходы беременности и данные о здоровье детей после родов				
1	вакуум-экстракция плода				
2	неотложное кесарево сечение				
3	плановое кесарево сечение				
4	преждевременные роды				
5	прерывание беременности				
6	ранние роды				
7	самостоятельные роды				
8	сверххранение роды				
9	срочные роды				
10	экстренное кесарево сечение				
11	P00.2	20	P24.0	29	P91.0
12	P03.4	21	P25.3	30	P92.1
13	P05.0, P05.1, P05.2	22	P28.9	31	Q21.0
14	P07.3	23	P29.1	32	Q24.9
15	P08.0, P08.1	24	P54.8	33	Q66.4
16	P12.0	25	P55	34	Q79.0
17	P20.0, P20.1, P20.9	26	P59.8	35	Z37.0, Z37.2
18	P21.0, P21.1	27	P61.9	36	Z38.0, Z38.3
19	P22.0, P22.1	28	P70.0		

Синотова С.Л., Лимановская О.В., Плаксина А.Н.

ОТБОР ИЗ АКУШЕРСКОГО АНАМНЕЗА ЖЕНЩИН ПРИЗНАКОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ИСХОД БЕРЕМЕННОСТИ, ПОЛУЧЕННОЙ С ПОМОЩЬЮ ЭКО

Аннотация. В данной статье был проведен корреляционный анализ для поиска факторов из акушерского анамнеза женщины, влияющих на исход беременности, полученной с помощью ЭКО. Исходные данные включают сроки и способы родоразрешения, диагнозы детей на этапе роддома.

Ключевые слова: корреляционный анализ, достигаемый уровень значимости, анализ малых данных, вспомогательные репродуктивные технологии, V Крамера, критерий согласия хи-квадрат, точный критерий Фишера, математическая статистика.

Abstract. This article conducted a correlation analysis to search for factors from the obstetric history of a woman that affect the outcome of IVF pregnancy. Initial data include terms and methods of childbirth, diagnoses of children at the stage of the maternity hospital.

Keywords: p-value, analysis of small data, assisted reproductive technologies, Cramer's V, Chi-square test, Fisher's exact test, mathematical statistics.

Введение

ЭКО – медицинская технология, помогающая родить ребенка в случае бесплодия. Успешность ЭКО для будущих родителей определяется не только возникновением беременности, но и здоровьем будущего ребенка. Отсутствие систематических данных о результатах беременностей и рожденных детях существенно осложняют проведение объективного анализа.

В настоящее время не определен единый набор факторов, который мог бы прогнозировать исход полученной беременности.

Работа посвящена поиску влияния на исход текущей беременности, полученной с помощью ЭКО, таких факторов как внематочная беременность, самостоятельные/оперативные срочные или преждевременные роды, выкидыш, аборт, регрессирующая беременность, указанных в акушерском анамнезе женщины. Исход включает в себя данные о сроке и способе родоразрешения, диагноз ребенка на этапе родильного дома.

Образцы и методика эксперимента

Выводы сделаны на основе базы, полученной в Автоматизированной системе «Региональный акушерский мониторинг» (АС «РАМ») (свидетельство о государственной программе для ЭВМ № 2017619189 от 16.08.2017). Для

9. Информзащита. Системный интегратор: Федер. закон № 187-ФЗ. – URL: <https://infosec.ru/glavnye-temy/187-fz/> (дата обращения: 22.03.2020).
10. Питерсон. Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем / Дж. Питерсон. – Москва : Мир, 1984. – 264 с.
11. Котов В. Сети Петри / В. Котов. – Москва : Наука, 1984. – 160 с.
12. Сети Петрию // Википедия : свобод. энцикл. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Сети_Петри (дата обращения: 23.03.2020).
13. Имитационное моделирование // Википедия : свобод. энцикл. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Имитационное_моделирование (дата обращения: 25.03.2020).
14. Лычкина. Н. Н. Имитационное моделирование экономических процессов : учеб. пособие / Н. Н. Лычкина. – Москва : ИНФРА-М, 2013. – 254 с. – URL: <http://simulation.su/uploads/files/default/2005-uch-posob-lychkina-1.pdf> (дата обращения: 26.03.2020).
15. Моделирование систем с использованием Марковских случайных процессов. – URL: <http://kopilka77.ru/docs/gsv/disciplini/model/L3.pdf> (дата обращения: 26.03.2020).
16. Методология IDEF0. – URL: https://www.sites.google.com/site/anisimovkhv/learning/pris/lecture/tema6/tema6_2 (дата обращения: 27.03.2020).
17. Новые информационные технологии для тебя. Концептуальные карты или концепт-карты. – URL: <https://nitforyou.com/konceptualnye-karty/> (дата обращения: 28.03.2020).

В ходе экспериментального исследования определены условия устранения деструктов и время, необходимое на обнаружение и устранение деструкта. Как показал анализ результатов экспериментального исследования, наиболее долгим временем обнаружение и устранение обладают Destr 2, Destr 5 и Destr 6, что подчеркивает необходимость наиболее частых и внимательных проверок системы безопасности СКИИ. Destr 2 – ошибки инфраструктурного анализа, второй деструкт по степени критичности деструктивного воздействия на СКИИ, который может возникнуть на двух стадия жизненного цикла КИИ: «Проектирование системы защиты СКИИ» и «Сопровождение СКИИ», что подчеркивает необходимость более тщательного и внимательного инфраструктурного анализа СКИИ.

Введенная шкала оценки деструктивного воздействия на СКИИ, определяет комплексный подход к оценке и позволяет определить уровень критичности деструктивного воздействия на СКИИ, в случае возникновения инцидента информационной безопасности.

Библиографический список

1. О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации : Федер. закон от 26.07.2017 № 187-ФЗ. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_220885/ (дата обращения: 13.03.2020).
2. Critical Information Infrastructure : site. – URL: https://publicwiki-01.fraunhofer.de/CIPedia/index.php/Critical_Information_Infrastructure#cite_note-70 (accessed: 15.03.2020).
3. Presidential directive PDD-63 22 may 1998. – URL: <https://fas.org/irp/offdocs/pdd/pdd-63.htm> (accessed: 14.03.2020).
4. О европейских критических инфраструктурах и мерах по их защите : Директива Совета Европейского Союза 2008/114/ЕС от 8 дек. 2008 г. – URL: <https://base.garant.ru/70333008/> (дата обращения: 14.03.2020).
5. Лукацкий. А. Статистика реальных инцидентов ИБ в промышленных системах / А. Лукацкий // Securitylab. – URL: https://www.securitylab.ru/blog/personal/Business_without_danger/38672.php (дата обращения: 20.03.2020).
6. Актуальные киберугрозы 2019 года. – URL: <https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/cybersecurity-threatscape-q1-2019/#id3> (дата обращения: 20.03.2020).
7. Деструктивное воздействие // Википедия : свобод. энцикл. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Деструктивное_воздействие (дата обращения: 21.03.2020).
8. Common Threats and Vulnerabilities of Critical Infrastructures / Rosslin John Robles1, Min-kyu Choi1, Eun-suk Cho [et al.] // International Journal of Control and Automation. – P. 17–22. – URL: http://article.nadiapub.com/IJCA/vol1_no1/3.pdf (accessed: 14.03.2020).

Исследование полученной функциональной модели (рисунок 2) и функции зависимости деструктов (1) позволило определить шкалу оценки уровня критичности деструктивного воздействия на СКИИ. Под уровнем критичности в данном случае будем понимать уровень негативного воздействия, который характеризует появление уязвимостей в СКИИ.

Шкала оценки уровня критичности деструктивного воздействия на СКИИ:

- 1-уровень критичности – самый высокий уровень отрицательного воздействия, который появляется в результате воздействия Destr 1, так как согласно функции зависимости от Destr 1 зависят остальные деструкты.
- 2-уровень критичности – уровень, характеризующийся воздействием Destr 2.
- 3-уровень критичности – характеризуется воздействием Destr 3.
- 4-уровень критичности – воздействие Destr 4.
- 5-уровень критичности – воздействие Destr 5.
- 6-уровень критичности – воздействие Destr 6.

Введение данной шкалы позволит комплексно оценить деструктивное воздействие на СКИИ без привязки к конкретной сфере функционирования субъекта, решить проблему оценки деструктивного воздействия на СКИИ на локальном уровне. В случае возникновения инцидента информационной безопасности, после определения уязвимости, которая способствовала реализации атаки, шкала поможет определить уровень критичности деструктивного воздействия на СКИИ.

Заключение

Исследование жизненного цикла СКИИ позволило определить 6 видов деструктов инфраструктурного характера. Для экспериментального исследования выделены параметры оценки деструктивного воздействия на СКИИ. По выделенным параметрам оцениваются и сравниваются модели действия деструктов на сетях Петри.

Экспериментальное исследование показало, что существует зависимость активации реализации одних деструктов от других. Наиболее опасным деструктом является Destr 1, так как он активирует появление всех остальных деструктов и имеет наибольшее время жизни в процессе жизненного цикла СКИИ. Следовательно, стадия «Анализ требований для СКИИ» жизненного цикла СКИИ является наиболее ответственной и важной для последующего функционирования СКИИ.

В ходе экспериментального исследования выявлены условия устранения деструктов и время, которое необходимо для их обнаружения и устранения. В результате стало возможным сравнение времени жизни деструкта в процессе жизненного цикла СКИИ, со временем, необходимым для его устранения (рисунок 4). В случае с Destr 1, Destr 3 и Destr 4 стоит отметить, что возможное время их устранения гораздо меньше, чем время их воздействия до конца жизненного цикла СКИИ. Однако, следует обратить внимание на такие деструкты, как Destr 2, Destr 5 и Destr 6. Наибольшая опасность их воздействия заключается в том, что время, необходимое на их исправление гораздо больше, чем время жизни до конца жизненного цикла СКИИ. Т.е. возможность обнаружить и нейтрализовать воздействие данных деструктов существует только при повторном прохождении жизненного цикла СКИИ. Большое значение времени обнаружения и устранения увеличивает вероятность успешной реализации атак злоумышленниками, которые могут использовать уязвимости СКИИ.

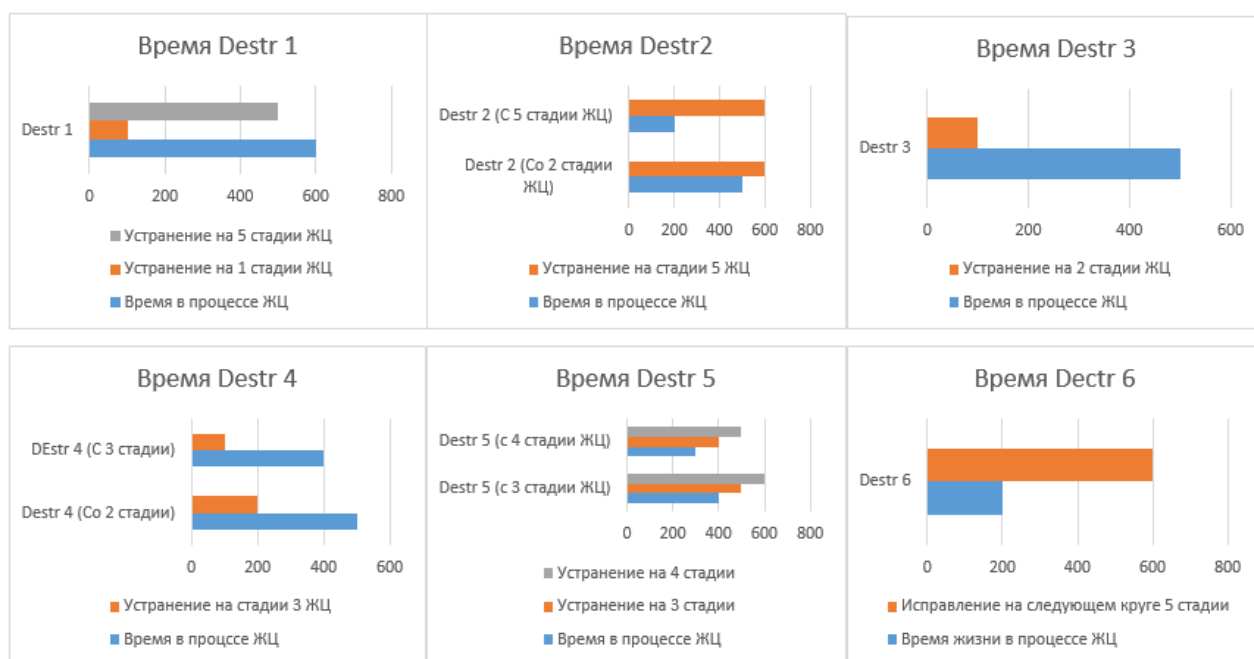


Рисунок 4 – Распределение времени деструктов на стадиях жизненного цикла СКИИ

В результате анализа функциональной модели IDEF0 (рисунок 2), выведена следующая функция взаимозависимости деструктов:

$$\text{Destr6} = \text{Destr6}(\text{Destr5}(\text{Destr4}(\text{Destr3}(\text{Destr2}(\text{Destr1})))) \quad (1)$$

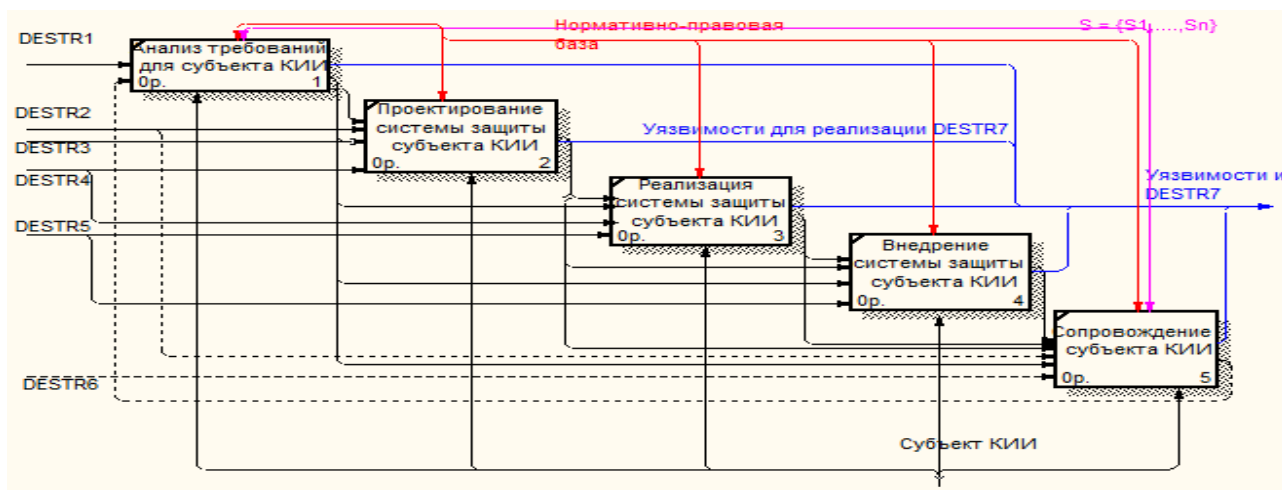


Рисунок 2 – Модель IDEF0, отражающая взаимовлияние (последствие) деструктов на стадиях жизненного цикла СКИИ

В процессе проведения экспериментального исследования, один из значимых параметров для оценки деструктивного воздействия на СКИИ- время жизни деструктов в процессе жизненного цикла СКИИ. Данный параметр представляет собой время в единицах программного времени, за которое деструкт пройдет все стадии жизненного цикла (рисунок 3).

Реализация некоторых деструктов возможна с двух стадий, что было также учтено при оценки данного параметра. Наиболее «живучим» является Destr 1, а также, при определенных условиях возникновения, Destr 2, Destr 3, Destr 4.



Рисунок 3 – Диаграмма времени жизни деструктов в процессе жизненного цикла СКИИ

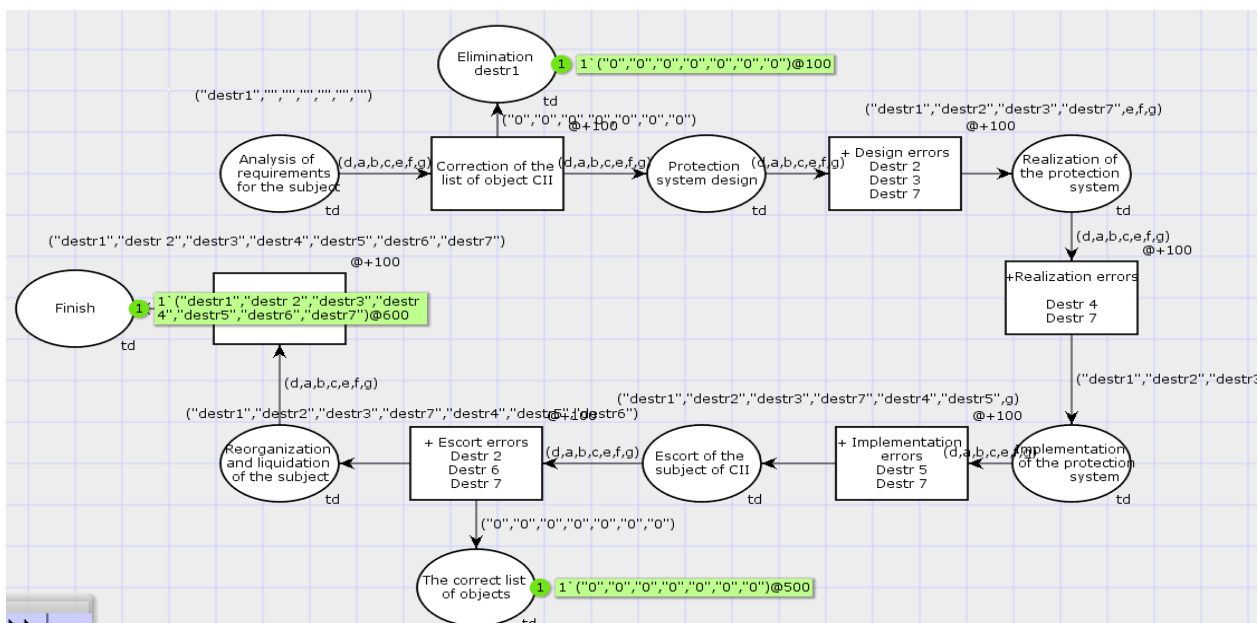


Рисунок 1 – Моделирование действия Destr 1

Модель воспроизводит сценарий зарождения Destr 1 на первой стадии жизненного цикла СКИИ с последующим прохождением всех остальных стадий. В модели учтены условия перекрывания Destr 1 на первой стадии жизненного цикла СКИИ, в случае корректировки списка объектов КИИ, подлежащих категорированию, а также на пятом этапе жизненного цикла СКИИ – сопровождение СКИИ в случае, если произошли инфраструктурные изменения.

Результаты и обсуждение

Анализ результатов экспериментального исследования показал, что наиболее критичная стадия жизненного цикла СКИИ – анализ требований для СКИИ. В случае возникновения ошибок на первой стадии жизненного цикла СКИИ, т.е. появление Destr 1, появление остальных деструктов, а также уязвимостей, увеличивающих вероятность реализации атак на СКИИ, неизбежно. Вторым деструктом по уровню влияния на СКИИ является Destr 2 – ошибки инфраструктурного анализа. Анализ показал взаимосвязь появления деструктов от реализации других деструктов (рисунок 2). Модель IDEF0 наглядно демонстрирует взаимосвязь и взаимовлияние деструктов, в результате чего в системе СКИИ появляются уязвимости, которые могут быть использованы злоумышленниками для реализации атак – Destr 7.

- Destr 6 – ошибки при сопровождении СКИИ. Данный деструкт подразумевает Destr 2, в случае ошибок инфраструктурного анализа при изменении количества значимых объектов, подлежащих категорированию. Стадия сопровождения СКИИ реализует возврат на первую стадию жизненного цикла СКИИ, в случае изменения количества объектов КИИ, так как там осуществляется формирование перечня объектов КИИ, подлежащих категорированию. Существует вероятность перекрывания Destr 1 – ошибок при анализе требований.
- Destr 7 – угроза реализации атаки на СКИИ. Данный деструкт реализуется исходя из вышеперечисленных деструктов, особенно в случае ошибок в системе защиты СКИИ (Destr 4), реализованной с неперекрытыми уязвимостями, которые могут быть использованы для реализации атак на СКИИ.

Необходимо отметить, что не обнаружение (или не учет) деструкта на определенном этапе жизненного цикла СКИИ влечет за собой появление новых деструктов в дальнейшем (на последующих этапах). При этом можно определить значения таких показателей, как «уровень критичности деструкта» и «уровень критичности СКИИ».

Исходя из того, что возможность реализации каждого деструкта, за исключением Destr 7, зависит от конкретной стадии жизненного цикла СКИИ, которую проходит отдельно взятый субъект, для анализа оценки деструктивного воздействия на СКИИ предлагается математическая модель в дискретном времени.

Для оценки деструктивного воздействия выделены следующие параметры:

- Param1 – стадия жизненного цикла СКИИ, на которой появляется деструкт.
- Param2 – время жизни Destr, в случае, если деструкт не обнаруживается в жизненном цикле СКИИ.
- Param3 – условия устранения деструкта.
- Param4 – время жизни Destr, в случае, если на каком-либо этапе жизненного цикла деструкт обнаруживается и устраняется.
- Param5 – порождение дополнительных деструктов.

Для каждого деструкта собирается отдельная модель при помощи сетей Петри, оцениваемая по параметрам. На рисунке 1 представлена модель оценки деструктивного воздействия на СКИИ для Destr 1 «ошибки при анализе требований для СКИИ», собранная в программе CPN Tools.

ошибки в формировании перечня требований по обеспечению безопасности значимы объектов КИИ, а также ошибки при формировании мер для перекрывания требований по обеспечению безопасности значимых объектов КИИ. В случае обнаружения ошибок в категорировании и корректного исправления, возможно перекрывание данного деструкта частично, так как исправление ошибок при категорировании не гарантирует отсутствие ошибок в формировании мер для перекрывания требований по обеспечению безопасности значимых объектов КИИ.

- Destr 4 – ошибки при реализации системы защиты СКИИ. На стадии реализации системы защиты СКИИ возможно частичное перекрывание Destr 3, при проверке требований по обеспечению безопасности значимых объектов КИИ, а также мер защиты по перекрыванию данных требований. На данной стадии жизненного цикла СКИИ осуществляется реализация мер по защите СКИИ и тестирование системы защиты СКИИ с последующим ее исправлением. В случае некорректной проверки требований по обеспечению безопасности значимых объектов КИИ и мер защиты по перекрыванию данных требований появляются ошибки в реализации мер защиты СКИИ, то есть ошибки в системе защиты. При реализации системы защиты КИИ возможны ошибки в выполнении и реализации требований и мер защиты СКИИ, даже если система защиты СКИИ была спроектирована верно. Ошибки при тестировании системы защиты СКИИ влекут за собой ошибки в исправлении системы защиты СКИИ. В результате система защиты СКИИ имеет целый ряд уязвимостей, которые могут быть использованы для реализации атак Destr 7.
- Destr 5 – ошибки при внедрении системы защиты СКИИ. Destr 4 влечет за собой Destr 5, то есть внедрение системы защиты СКИИ, в которой имеются непокрытые уязвимости. В случае корректной системы защиты СКИИ существует возможность ошибок при внедрении системы защиты на всем СКИИ. Также в данный деструкт входят ошибки, связанные с уведомлением персонала об изменениях защиты и новых правилах реализации системы защиты. Исправление ошибок внедрения возможно при повторном прохождении жизненного цикла в случае, если на стадии сопровождения были обнаружены инфраструктурные изменения, в результате чего произошел переход на стадию 1. В этом случае возможно последующее прохождение стадий жизненного цикла без появления деструктов.

помощью данной методологии можно постепенно выстраивать и анализировать систему даже тогда, когда трудно еще представить ее воплощение. Основу методологии IDEF0 составляет графический язык описания процессов. Модель в нотации IDEF0 представляет собой совокупность иерархически упорядоченных и взаимосвязанных диаграмм. Каждая диаграмма является единицей описания системы и располагается на отдельном листе.

Для проведения анализа деструктивного воздействия на СКИИ в общем виде на локальном уровне предлагается подход, основанный на исследовании жизненного цикла СКИИ. Стадии жизненного цикла СКИИ: 1. Анализ требований для СКИИ, 2. Проектирование системы защиты СКИИ, 3. Реализация системы защиты СКИИ, 4. Внедрение системы защиты СКИИ, 5. Сопровождение СКИИ, 6. Реорганизация и ликвидация СКИИ.

Исходя из стадий жизненного цикла СКИИ и их особенностей, выделим следующие виды деструктов:

- Destr 1 – ошибки при анализе требований для СКИИ. Исходя из подэтапов первой стадии жизненного цикла СКИИ, возможны следующие ошибки: ошибки в определении критических процессов, ошибки в перечне объектов КИИ, подлежащих категорированию, ошибки при проверке и согласовании перечня объектов, подлежащих категорированию. Однако, в случае корректной проверки перечня объектов КИИ, подлежащих категорированию, и исправлении перечня объектов, данный деструкт станет неактуальным для СКИИ и его воздействие прекрывается.
- Destr 2 – ошибки инфраструктурного анализа. Данный деструкт выделен отдельно от основных стадий жизненного цикла СКИИ. Ошибки инфраструктурного анализа могут возникать на стадиях проектирования системы защиты СКИИ и его сопровождения. Инфраструктурный анализ определяет взаимосвязь и взаимовлияние объектов КИИ. Данный деструкт характеризует влияние атаки на объекты КИИ, которые взаимосвязаны с атакованным объектом. Неверный инфраструктурный анализ влияет на оценку рисков реализации атаки. На стадии сопровождения инфраструктурный анализ учитывает изменение количества объектов, что приводит к необходимости повторного прохождения стадий жизненного цикла СКИИ, начиная с первой стадии.
- Destr 3 – ошибки в проектировании системы защиты. Исходя из подэтапов стадии проектирования системы защиты СКИИ, следует выделить следующие возможные ошибки: ошибки в категорировании объектов КИИ, где возможен Destr 2, исходя из ошибок категорирования,

Опираясь на определение деструктивного воздействия [7], под деструктом КИИ будем понимать фактор, угрозу, ошибку, предмет или способ реализации того, что ведет к неблагоприятным и разрушительным последствиям для СКИИ.

Деструктивное воздействие на СКИИ можно рассматривать на глобальном и локальном уровнях. Глобальный уровень подразумевает косвенное деструктивное воздействие на СКИИ. Реализация успешной атаки на СКИИ влечет за собой косвенное воздействие на другие СКИИ, которые могут быть не только из сферы атакованного субъекта. Взаимосвязь и взаимовлияние СКИИ объясняется взаимосвязью сфер деятельности, в которых они функционируют [1, 8, 9].

Деструктивное воздействие на локальном уровне рассматривает воздействие непосредственно на сам СКИИ и его критически важные объекты. Основная проблема анализа деструктов СКИИ заключается в многообразии сфер их деятельности. Определить набор деструктов для каждого объекта КИИ – не сложная задача, в отличие от задачи, связанной с проведением комплексного деструктивного анализа СКИИ.

Образцы и методика эксперимента

Для анализа и оценки деструктивного воздействия на СКИИ используются следующие методы и подходы: сети Петри (моделирующая система CPN Tools); имитационное моделирование; моделирование систем с использованием Марковских случайных процессов; функциональное моделирование; концептуальные карты.

В результате анализа данных методов [10 – 17], в качестве наиболее рациональных определены: сети Петри – для проведения оценки деструктивного воздействия и моделирования работы деструктов, а также функциональное моделирование – для анализа полученных результатов моделирования.

Сети Петри (моделирующая система CPN Tools) – математический аппарат для моделирования динамических дискретных систем. Сеть Петри представляет собой двудольный ориентированный мультиграф, состоящий из вершин двух типов – позиций и переходов, соединённых между собой дугами. В позициях могут размещаться метки (маркеры), способные перемещаться по сети. Событием называют срабатывание перехода, при котором метки из входных позиций этого перехода перемещаются в выходные позиции [10-12]. События происходят мгновенно либо одновременно, при выполнении некоторых условий.

Функциональное моделирование (IDEFO (Erwin)) позволяет описывать любые системы, в том числе информационные, создавать описание системы и ее внешнего окружения до определения окончательных требований к ней [16]. Т.е. с

Шихвердиева А.Ш., Максимова Е.А.

ОЦЕНКА ДЕСТРУКТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СУБЪЕКТЫ КРИТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Аннотация. В связи с высоким риском информационной безопасности сфер, к которым отнесены субъекты критической информационной инфраструктуры (СКИИ), появляется необходимость в разработке комплексной оценке деструктивного воздействия на них. Предлагается подход оценки деструктивного воздействия на СКИИ, основанный на жизненном цикле, который характеризует субъект не зависимо от сферы его функционирования. Предлагается шкала оценки уровня критичности деструктивного воздействия на СКИИ.

Ключевые слова: критическая информационная инфраструктура, субъект, жизненный цикл, деструкт, деструктивное воздействие, сети Петри, уровень критичности, модель.

Abstract. Due to the high risk of information security in the areas to which the subjects of critical information infrastructure (SCII) are assigned, it becomes necessary to develop a comprehensive assessment of the destructive impact on them. The approach of assessing the destructive impact on SCII based on the life cycle that characterizes the subject regardless of the scope of its functioning is proposed. A scale for assessing the criticality level of destructive impact on SCII is proposed.

Keyword: critical information infrastructure, subject, life cycle, destruction, destructive impact, Petri nets, criticality level, model.

Введение

В Российской Федерации о критической информационной инфраструктуре (КИИ) заговорили в 2017 году, после утверждения Федерального закона от 26.07.2017 N 187-ФЗ [1]. В сравнении с мировым опытом, Россия несколько отстала в данном вопросе [2]. Американская президентская директива PDD-63 в мае 1998 года учредила национальную программу «Защита критической инфраструктуры» [3]. В то время как Россия занялась данным вопросом в теории, большинство стран Европы уже активно занимаются защитой КИИ и имеют в данном вопросе значительный опыт [4].

К наиболее опасным и подверженным угрозам отраслей входят энергетика, нефтегаз, транспорт и водоснабжение [5]. Также следует обратить внимание, что среди юридических лиц наиболее часто злоумышленники атакуют государственные организации, медицинские учреждения, промышленные компании, банки и другие организации финансовой сфере [6]. Большая часть отраслей, популярных для атак, относятся к отраслям КИИ.

8. Characterisation of airborne particles in London by computer-controlled scanning electron microscopy / B. Sitzmann, M. Kendall, J. Watt, I. Williams // *Science of The Total Environment*. – 1999. – Vol. 241. – P. 63–73.
9. Development and evaluation of a palm-sized optical PM 2.5 sensor / T. Nakayama, Y. Matsumi, K. Kawahito, Y. Watabe // *Aerosol Science and Technology*. – 2018. – Vol. 52, Is. 1. – P. 2–12.
10. Диффузионный аэрозольный спектрометр (ДАС) модель 2702 (2702-M) // ООО "АэроНаноТех". – URL: http://ru.aeronanotechnology.com/diffuzionnyu_aerolnyu_spektrometr (accessed: 14.03.2020).
11. Environmental Dust Monitoring // GRIMM Aerosol Technik Ainring GmbH & Co. KG. – URL: <https://www.grimm-aerosol.com/products-en/environmental-dust-monitoring/> (accessed: 14.03.2020).
12. Speciation and origin of PM10 and PM2.5 in selected European cities / X. Querol, A. Alastuey, C. R. Ruiz [et al.] // *Atmospheric Environment*. – 2004. – Vol. 38, Is. 38. – P. 6547–6555.
13. Anthropogenic and natural constituents in particulate matter in the Netherlands / E. P. Weijers, M. Schaap, L. Nguyen [et al.] // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2011. – Vol. 11, Is. 5. – P. 2281–2294.
14. Physicochemical characterisation of diesel exhaust particles: Factors for assessing biological activity / K. A. Bérubé, T. P. Jones, B. J. Williamson [et al.] // *Atmospheric Environment*. – 1999. – Vol. 33, № 10. – P. 1599–1614.

Как и ожидалось, изучение строения и распределения вещества по поверхности и в объёме аэрозольных микрочастиц является нетривиальной задачей, и требует всесторонней разработки методики их исследования. Тем не менее, результаты первых измерений на масс-спектрометре вторичных ионов можно считать успешными. Частицы с характерным размером порядка 15 мкм могут быть визуализированы из полученных масс-спектров. Также удалось выявить ряд задач, связанных с отбором и подготовкой пробы для масс-спектрометрических исследований, решение которых необходимо для улучшения методики выполнения эксперимента. Интересным представляется анализ различий в строении и химическом составе аэрозоля на городской и на фоновой территориях, однако это является предметом будущих работ.

Благодарность

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-05-50138. Также, выражаем благодарность Вазирову Руслану Альбертовичу, сотруднику кафедры экспериментальной физики ФТИ УрФУ, за помощь в проведении микроскопических исследований.

Библиографический список

1. Contributions to cities' ambient particulate matter (PM): A systematic review of local source contributions at global level / F. Karagulian, C. A. Belis, C. F. C. Dora [et al.] // *Atmospheric Environment*. – 2015. – Vol. 120. – P. 475–483.
2. Outdoor Particulate Matter Exposure and Lung Cancer: A Systematic Review and Meta-Analysis / G. B. Hamra, N. Guha, A. Cohen [et al.] // *Environ Health Perspect.* – 2014. – Vol. 122, Is. 9. – P. 906–911.
3. Air Pollution and Noncommunicable Diseases / D. E. Schraufnagel, J. R. Balmes; C. T. Cowl [et al.] // *Chest*. – 2019. – Vol. 155, № 2. – P. 417–426.
4. Buseck P. R. Airborne minerals and related aerosol particles: Effects on climate and the environment / P. R. Buseck., M. Posfai // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – 1999. – Vol. 96, Is. 7. – P. 3372–3379.
5. Rat lung response to ozone and fine particulate matter (PM_{2.5}) exposures: Rat Lung Response to Ozone And Fine Pm_{2.5} Exposures / G. Wang, J. Zhao, R. Jiang, W. Song // *Environmental Toxicology and Chemistry*. – 2015. – Vol. 30, Is. 3. – P. 343–356.
6. Chemical composition of PM_{2.5} at an urban site of Chengdu in southwestern China / J. Tao, Z. Shen, C. Zhu [et al.] // *Advances in Atmospheric Sciences*. – 2013. – Vol. 30, № 4. – P. 1070–1084.
7. The contribution of anthropogenic sources to the aerosols over East China Sea / F. Wang, Y. Chen, X. Meng, J. Fu [et al.] // *Atmospheric Environment*. – 2016. – Vol. 127. – P. 22–33.

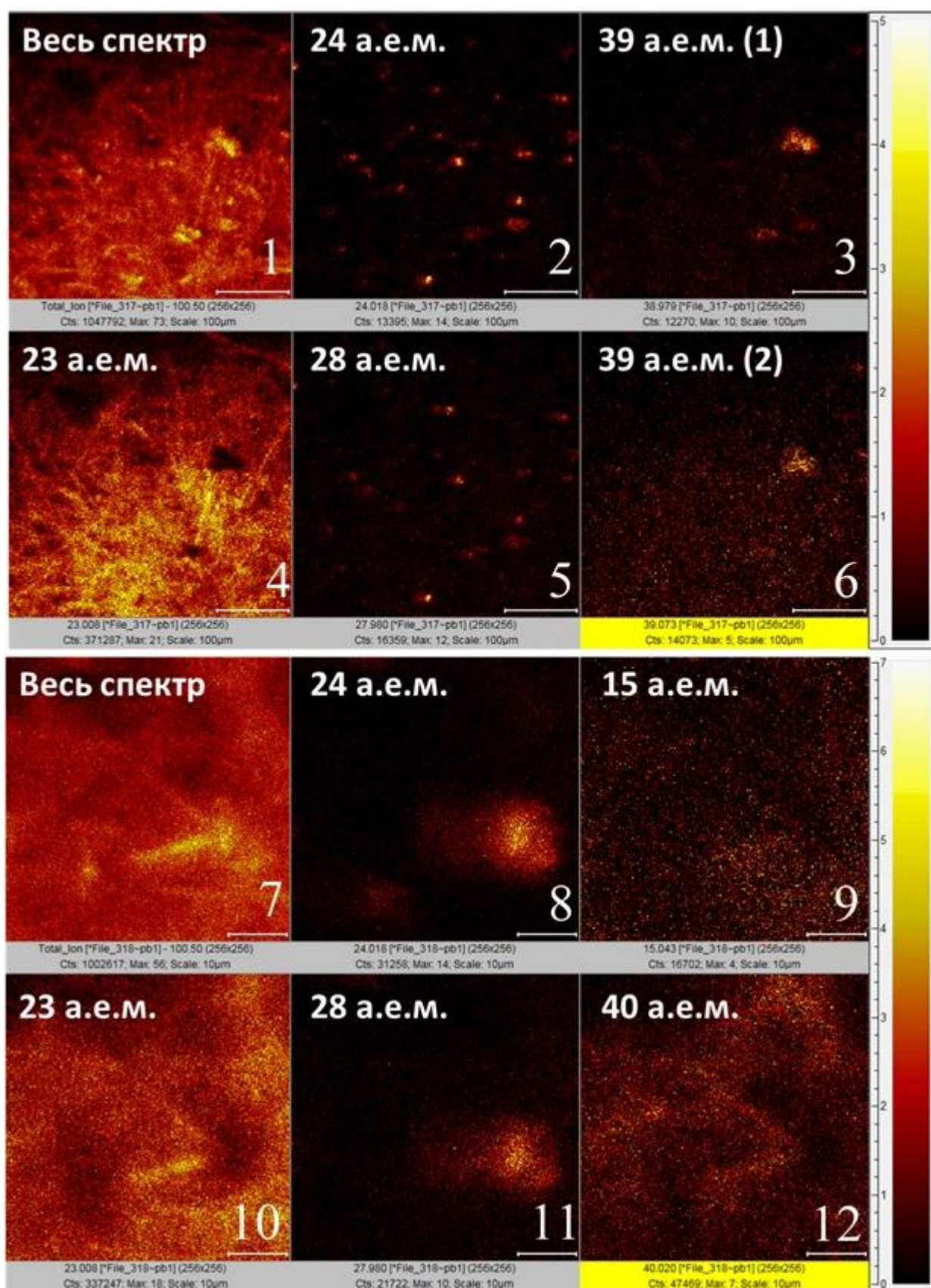


Рисунок 4 – Визуализация результатов масс-спектрометрии поверхности фильтра КФБЖ. 1 – 6: растр: 400x400 мкм; 7 – 12: растр: 50x50 мкм.

и нацеливались на неё с последующим увеличением разрешения до 50х50 мкм (рисунок 4, фрагменты 7–12). Выбор произвольной области измерения делался из предположения о равномерном распределении микрочастиц любого размера и состава по поверхности фильтра. На рисунке легко различимы крупные частицы размером от 15 мкм. Возможно, некоторые из них состоят из более мелких микрочастиц, имеющих тенденцию к агломерации [8,14], что можно проследить на снимках, полученных микроскопом. Представление распределения ионов с разной массой сделано для демонстрационных целей, анализ химического состава данной пробы атмосферного аэрозоля будет осуществлён в отдельной работе.

Неоднородность и многослойность фильтра КФБЖ представляет собой существенное затруднение для отработки разрабатываемой методики. Волокнистая структура может приводить к искажениям в снимаемых масс-спектрах, так как ионная пушка будет выбивать вторичные ионы сразу же на нескольких слоях. Тогда при визуализации полученный масс-спектр может быть интерпретирован как сигнал от большой единой частицы. Возможно, потребуется осуществлять предварительную подготовку фильтров перед измерением, что, тем не менее, связано с опасностью внести изменения в их структуру, что также приведёт к искажению результатов. Или необходимо использовать иные типы фильтров, с более однородной поверхностью. Отдельный интерес представляет валовый химический анализ вещества фильтра в отсутствие и при наличии пробы; идеальным вариантом было бы использование фильтра, состоящего из одного химического элемента, не характерного для атмосферного аэрозоля. Другим направлением дальнейшего развития методики может быть отбор аэрозольных микрочастиц различных фракций, что обеспечивается применением каскадных импакторов либо набором фильтров с постепенным уменьшением размеров улавливаемых частиц.

Заключение

Полученные результаты представляют важность для дальнейшего комплексного исследования атмосферного аэрозоля в приземном слое воздуха крупных городов Среднего Урала. На основании непрерывных измерений концентрации аэрозоля $PM_{2.5}$ на городской и фоновой территории показано, что концентрация мелкодисперсного аэрозоля в городе статистически значимо выше. Предположение о влиянии антропогенных источников может быть проверено путём регулярного химического анализа проб атмосферы на этих территориях.

для фильтрации биологических жидкостей, Ø293 мм). Для прокачки атмосферного воздуха применялся большеобъёмный пробоотборник Strohle Instruments HVS 1500. Отбор проб был осуществлён в период с 18 по 23 декабря 2019 г. в дневное время. Объём прокачанного воздуха составил 1000 м³ со средним расходом 55 м³/ч. В этот период наблюдалось превышение концентрации аэрозоля РМ_{2.5} над среднегодовыми значениями; в дневное время среднее значение концентрации составляло 15±6 мкг/м³.

На рисунке 3 представлены результаты микроскопического исследования поверхности фильтра КФБЖ после отбора пробы атмосферного аэрозоля. Как и следовало ожидать из типа данного фильтра, он обладает неоднородной волокнистой структурой. Значительная часть аэрозоля распределена в глубине фильтра, и её изучение потребует дополнительной подготовки пробы. Профилометрическое исследование поверхности подтверждает данные выводы: локализовать удаётся только крупные частицы (около 20 мкм), определение местоположения более мелких частиц затруднено волокнистой структурой фильтра (диаметр волокон сопоставим с размерами микрочастиц, а их расположение в пространстве является неупорядоченным).

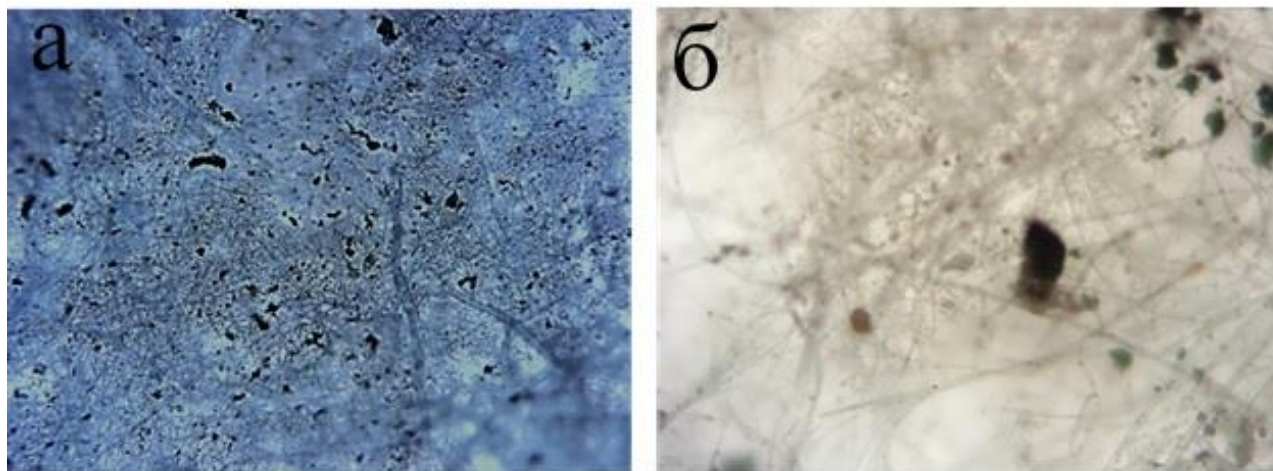


Рисунок 3 – Результаты микроскопического исследования фильтров КФБЖ с 100- (а) и 400-кратным (б) увеличением.

Для проведения исследований методом масс-спектрометрии вторичных ионов, фильтр был разрезан на части площадью около 3 см². Результаты измерений представлены на рисунке 4 с визуализацией распределения ионов по видимой поверхности фильтра (представлено отображение для наиболее интенсивных сигналов). Сначала выбиралась произвольная область на поверхности фильтра с размером поля зрения масс-спектрометра размером в 400х400 мкм (рисунок 4, фрагменты 1–6), внутри которой искали микрочастицу

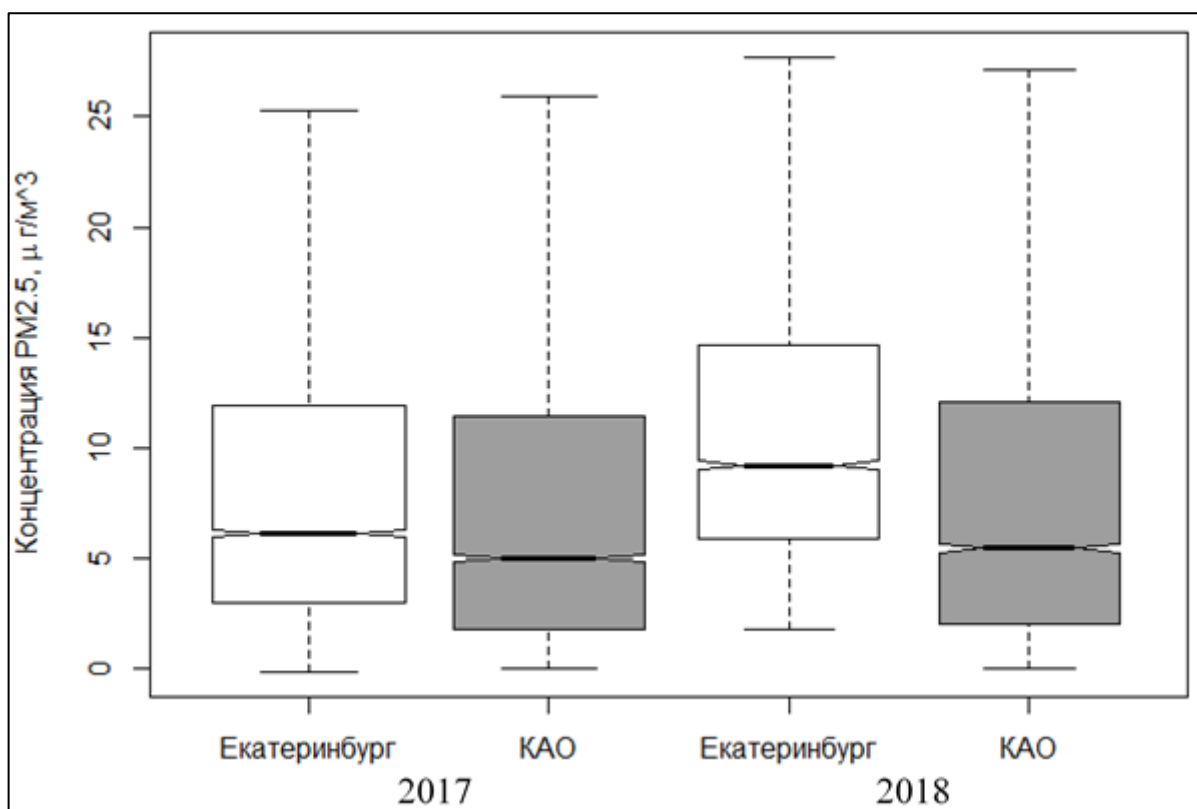


Рисунок 2 – Сравнение приземных концентраций $PM_{2.5}$ в 2017 и 2018 годах, измеренные в городских и фоновых условиях.

Представленные в таблице 1 статистические характеристики, также показывают, что как медианные, так и средние значения на городской территории выше. При этом, можно заметить, что в фоновом пункте измерений значения максимумов близки к значениям, полученным в городском пункте измерений. Такие концентрации являются следствием влияния локальных источников, например, дыма от угольной котельной, расположенной на территории обсерватории, и печного отопления близлежащего населённого пункта. Помимо расположения сенсора $PM_{2.5}$ в пространстве относительно окружающих объектов и рельефа местности, своё влияние оказывают и метеоусловия. Так, во время выпадения осадков, при определённых скоростях и направлениях ветра, наблюдаются высокие значения концентрации. При этом, из-за особенностей рельефа фоновой территории, данный эффект проявляется сильнее, чем на территории городского пункта измерений. Кроме этого, исходя из медианных значений, можно сделать вывод о том, что частота проявления таких высоких концентраций довольно низкая.

Отбор проб атмосферного аэрозоля осуществлялся аспирационным методом на территории ИПЭ УрО РАН в городе Екатеринбург. Из опыта анализа валовых концентраций веществ, содержащихся в атмосферных пробах, для первых измерений решено было использовать дисковый фильтр КФБЖ (картон

Для масс-спектрометрического анализа микрочастиц необходимо было определить их положение в образце пробы. Чтобы ускорить этот процесс, каждое измерение было решено сопровождать микроскопией фильтров, что также служит цели качественного подтверждения наличия аэрозолей в образцах. Для этого использовался микроскоп МИКРОМЕД 3 вар. 3-20, съёмка выполнялась с 100- и 400- кратным увеличением. Кроме того, определение местоположения отдельных частиц дополнялось исследованием поверхности фильтра на профилометре Bruker DektakXT. Изученные таким образом части фильтра без дополнительной обработки помещались в время-пролётный масс-спектрометр вторичных ионов PHI TRIFT V nanoTOF. Пучок ионов цезия сканирует поверхность образца, выбивая вторичные ионы, масс-спектр которых и регистрируется. Обработав полученные результаты, воссоздаётся картина распределения вещества по поверхности и в объёме образца. В зависимости от необходимой точности, можно варьировать размер исследуемой области образца – растр поля зрения, состоящий из 256 на 256 ячеек (пикселей).

Результаты и обсуждение

Результаты измерений приземных концентраций аэрозоля $PM_{2.5}$ на фоновой и городской территориях за два полных года (2017 и 2018) представлены на рисунке 2 в виде боксовых диаграмм. Очевидно, что медианные значения и их доверительные интервалы, обозначенные горизонтальными полосами и засечками на боксах соответственно, не пересекаются, что свидетельствует о наличии статистически значимой разницы между выборками. Это также подтверждается тестом Манна-Уитни. Можно сделать предположение, что повышенная концентрация в Екатеринбурге является следствием большего количества антропогенных источников [12,13].

Таблица 1 – Статистические характеристики, полученные в ходе анализа результатов измерения концентрации аэрозоля $PM_{2.5}$ на городской и фоновой территориях (для всех концентраций, значения приведены в $мкг/м^3$).

	2017		2018	
	Екатеринбург	КАО	Екатеринбург	КАО
Минимум	0,0	0,0	0,0	0,0
1 квартиль	3,0	1,8	5,9	2,1
Медиана	6,1	5,0	9,2	5,5
Среднее	8,8	8,6	11,4	10,4
3 квартиль	11,9	11,5	14,6	12,1
Максимум	65,7	93,4	91,0	212,4

интеркалибровки и калибровки сенсоров с различными аэрозольными спектрометрами, к примеру, GRIMM или ДАС [10,11]. Результаты этих измерений являются основой для построения физико-математических моделей переноса аэрозолей в атмосфере, что позволяет воссоздать пути их распространения и определить источники выбросов.

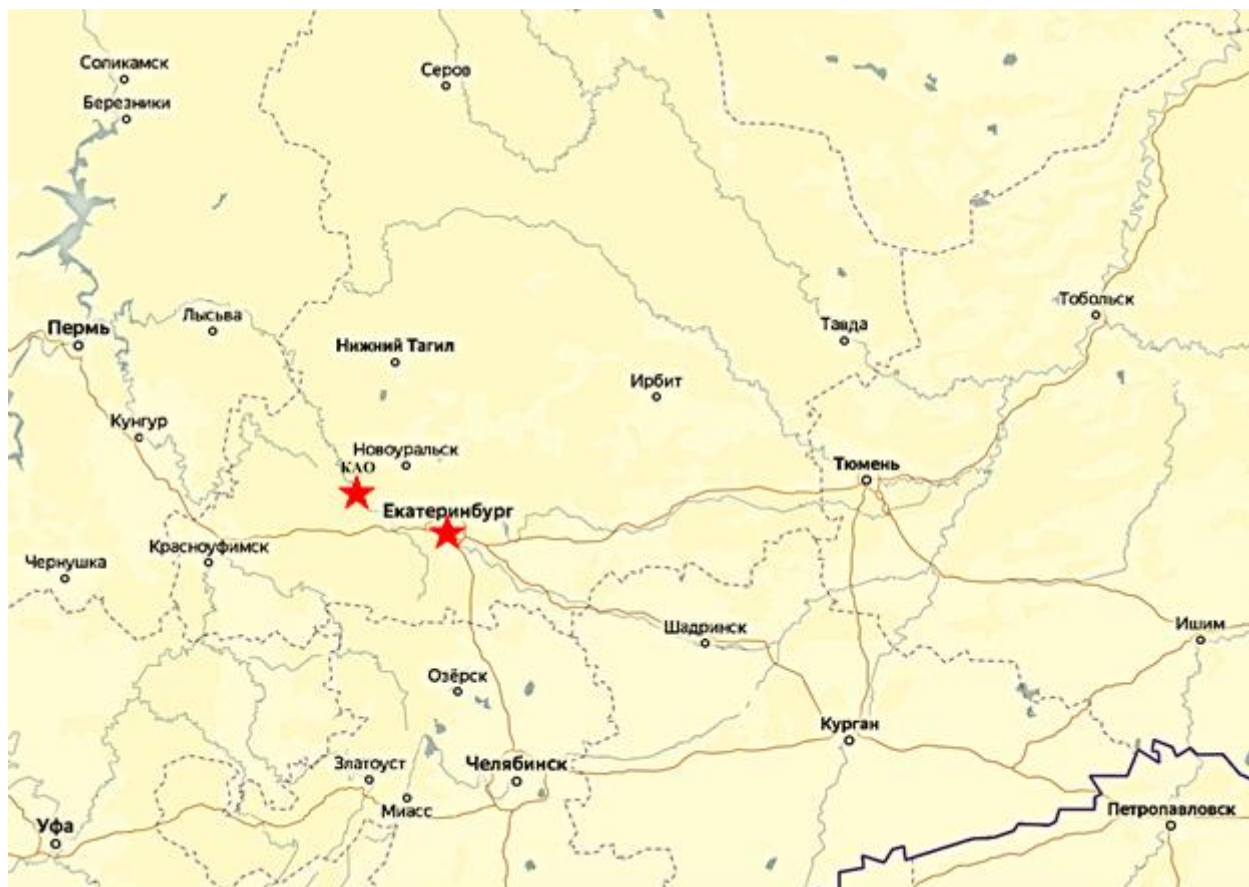


Рисунок 1 – Расположение пунктов атмосферных измерений в исследуемой области Среднего Урала

На кафедре технической физики Физико-технологического института УрФУ накоплен большой опыт анализа газов и твёрдых веществ методами масс-спектрометрии. Особенность изучения частиц атмосферного аэрозоля заключена в их микроскопических размерах, работа с которыми является нетривиальной задачей и связана с определёнными трудностями поиска и локализации единичной микрочастицы на поверхности или в объёме пробоотборного фильтра (при анализе валовых концентраций химических компонентов аэрозолей такая задача попросту не ставится). Ввиду разнообразия методов отбора аэрозольных микрочастиц, инициирована разработка методики отбора проб воздуха на фильтры, пригодной для работы с масс-спектрометром вторичных ионов, который позволяет изучить распределение вещества по поверхности и объёму частицы.

(particulate matter, PM), а также пути их распространения и взаимодействия в природе.

Многими исследователями подчёркивается важность наблюдения и контроля за аэрозолями с аэродинамическим диаметром до 10 мкм, оказывающих наибольшее влияние на климат, окружающую среду и здоровье населения [2–4]. Среди них в особенности выделяют $PM_{2.5}$ – взвешенные частицы с аэродинамическим диаметром до 2,5 мкм. Из-за своего характерного размера, эти частицы легко оседают в органах дыхания, преодолевают тканевый барьер и распространяются с кровью, приводя к развитию различных заболеваний и способствуя ухудшению качества жизни живого организма [3,5].

На сегодняшний день в основе исследований уровня атмосферного загрязнения лежит анализ валовых концентраций отдельных компонентов атмосферы [6,7]. Однако, для понимания взаимодействия аэрозолей с окружающей средой и более реалистичной оценки сопутствующих рисков необходимо проводить комплексные исследования, дополненные анализом структуры и химического состава микрочастицы, с изучением распределения вещества по её поверхности и объёму. Регулярное проведение таких измерений будет также способствовать определению источников атмосферного аэрозоля [8].

В данной работе представляются первые результаты, полученные в рамках проекта по комплексному исследованию аэрозольных примесей в атмосфере городов Среднего Урала. Первые измерения проводились на территории Екатеринбурга, являющегося крупнейшим городом в этом регионе. Для изучения структуры и химического состава микрочастиц, разрабатывается собственная методика отбора и подготовки проб, а также их анализа методами микроскопии и масс-спектрометрии вторичных ионов.

Методика эксперимента

Лабораторией эколого-климатических проблем Арктики Института промышленной экологии Уральского Отделения РАН осуществляется регулярное наблюдение за изменением концентрации аэрозольных микрочастиц $PM_{2.5}$ в приземном слое воздуха. Измерения выполняются непрерывно, с временным разрешением в 10 секунд, в двух стационарных пунктах: в Екатеринбурге на территории института ($56^{\circ}50'59.9''N$ $60^{\circ}39'14.0''E$) и на территории Коуровской астрономической обсерватории Уральского федерального университета ($57^{\circ}02'12.1''N$ $59^{\circ}32'50.4''E$). Месторасположение пунктов измерения в рассматриваемом регионе представлено на рисунке 1. Данные измерения реализованы с помощью сенсоров Panasonic PM2.5 [9]. Для поддержания высокой точности измерений проводятся регулярные

Щелканов А.А., Блинова М.О., Коваленко М.А.,
Купряжский А.Я., Лужецкая А.П., Маркелов Ю.И.,
Поддубный В.А., Гадельшин В.М.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА АЭРОЗОЛЬНЫХ МИКРОЧАСТИЦ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ ВОЗДУХА ГОРОДОВ СРЕДНЕГО УРАЛА

Аннотация. Многообразие источников аэрозольного загрязнения атмосферы, оказывающего существенное влияние на окружающую среду и здоровье людей, требует комплексного исследования аэрозольных микрочастиц. В данной работе представлены первые результаты по разработке новой методики изучения состава аэрозоля в приземном слое атмосферы городов Среднего Урала. Обсуждаются результаты двухлетних наблюдений за концентрацией аэрозолей $PM_{2.5}$ на городской и фоновой территориях. Продемонстрированы возможности масс-спектрометрии вторичных ионов для анализа строения и химического состава аэрозольных микрочастиц; рассмотрены основные трудности, возникшие при отработке методов подготовки пробы и проведения измерений.

Ключевые слова: атмосферный аэрозоль, $PM_{2.5}$, масс-спектрометрия, время-пролётная ВИМС.

Abstract. The variety of pollution sources of atmospheric aerosols, which have a significant impact on the environment and human health, requires a comprehensive analysis of aerosol microparticles. This paper presents the first results on the development of a methodology to study aerosols in surface layer of the urban atmosphere of the Middle Ural. The results of two-year observations of the concentration of fine particulate matter $PM_{2.5}$ in urban and rural reference territories are discussed. The analysis of the structure and chemical composition of aerosol microparticles are demonstrated using a secondary ion mass spectrometry; the main difficulties, faced in a sample preparation and during the measurement, are considered.

Keywords: atmospheric aerosol, particulate matter $PM_{2.5}$, mass spectrometry, time-of-flight SIMS.

Введение

Основное влияние на загрязнение атмосферы в современных городах оказывает широкое использование автотранспорта, большое количество энергетических и промышленных объектов [1]. В городах Среднего Урала сосредоточены различные предприятия металлургической, химической и атомной промышленности, что в совокупности представляет потенциальный риск для экологии всего региона и здоровья населения. Такое многообразие источников определяет строение, химический состав и, как следствие, физико-химические свойства выбрасываемых в атмосферу аэрозольных микрочастиц

Библиографический список

1. ГОСТ ИСО/МЭК 17025–2009. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий : принят Приказом Федер. агентства по техн. регулированию и метрологии от 4 апр. 2011 г. № 41-ст : дата введ. 2012-01-01. – Москва : Стандартиформ, 2012. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200085223> (дата обращения: 13.04.2020).
2. ИСО 9000–2015. Система менеджмента качества. Основные положения и словарь : принят Приказом Федер. агентства по техн. регулированию и метрологии от 28 сент. 2015 г. № 1390-ст : дата введ. 2015-11-01. – Москва : Стандартиформ, 2015. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200124393> (дата обращения: 17.04.2020).
3. «Риски» и «Возможности» в стандарте ISO 9001:2015: порознь или вместе? / В. А. Качалов // Методы менеджмента качества. – 2016. – № 7 – С. 26–36.
4. ГОСТ Р ИСО 9001–2015. Системы менеджмента качества. Требования : принят Приказом Федер. агентства по техн. регулированию и метрологии от 28 сент. 2015 г. № 1390-ст : дата введ. 2015-11-01. – Москва : Стандартиформ, 2015. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200124394> (дата обращения: 15.04.2020).
5. ГОСТ Р ИСО 31000–2019. Менеджмент риска. Принципы и руководство : принят Приказом Федер. агентства по техн. регулированию и метрологии от 10 дек. 2019 г. № 1379-ст : дата введ. 2020-03-01. – Москва : Стандартиформ, 2020. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200170125> (дата обращения: 15.04.2020).

Продолжение таблицы 3

1	2	3	4
Выполнение поверки СИ с оформлением результатов	Соблюдение работниками МС установленных требований в ОЕИ	1) Невыполнение персоналом установленных требований ОЕИ, в т.ч. нарушение выполнения требований методик поверки СИ 2) В процессе поверки СИ обнаружено, что эталон не пригоден для использования (сломан) 3) Личная выгода, соперничество работников МС 4) Ошибки в оформлении протоколов поверки СИ 5) Нарушение выполнения требований методик поверки СИ	Повышение квалификации работников МС; Проведение технического обслуживания эталонов

Идентификация рисков позволяет более полно учитывать внутренние и внешние факторы риска в деятельности МС, определяет пути обеспечения устойчивости, способности противостоять неблагоприятным ситуациям. Результатом идентификации является перечень рисков и возможностей на этапах поверки СИ.

При этом отдельно следует отметить, что мониторинг рисков и возможностей должен осуществляться ежегодно с целью идентификации всех произошедших изменений. Это позволит выявить новые риски, использовать недоступные ранее возможности, разработать новые мероприятия, оптимизировать существующие виды деятельности и т.п.

Управление рисками в метрологической службе необходимо осуществлять в рамках процессного подхода, с учетом специфики отрасли с использованием современных эффективных методов управления и организаций производства, а также с использованием инструментов менеджмента риска. В целях эффективной оценки рисков для процесса поверки СИ необходима идентификация рисков, которая заключается в комплексном подходе: необходимо учитывать как внешние, так и внутренние факторы среды, требования заинтересованных сторон.

Разработанный перечень типовых рисков и возможностей поверки средств измерений поможет метрологическим службам оценить свои риски и возможности, что в свою очередь, приведет к повышению уровня идентификации и оценки рисков в метрологических службах.

Продолжение таблицы 3

1	2	3	4
		4) Невозможность создания необходимых условий проведения поверки СИ по причине отсутствия вспомогательного оборудования	
Поверка на наличие СИ в Федеральном информационном фонде по ОЕИ	Законодательство в области обеспечения единства измерений	1) Отсутствие или сбой сети интернет 2) Отсутствие в Федеральном информационном фонде данных о СИ	Резервный ПК с выходом в интернет-портал; Выявление СИ не утвержденного типа СИ при метрологическом надзоре в подразделении
Проверка возможности выполнения поверки СИ в соответствии с областью аккредитации	Законодательство в области обеспечения единства измерений	1) Область аккредитации не предусматривает выполнение поверки СИ данного типа	Расширение области аккредитации МС
Определение методики поверки СИ	Нормативное обеспечение	1) Отсутствие методики поверки в лаборатории МС 2) Отсутствие формы протокола в перечне установленных форм	Планирование в бюджет отдела приобретение необходимых методик поверки СИ. Унификация протоколов поверки СИ (приведение к единой форме)
Выбор эталонного оборудования для поверки СИ в соответствии с методикой поверки	Оснащенность МС; Центры стандартизации и метрологии	1) Эталон находится в поверке 2) Эталонное оборудование забраковано	Создание базы дублирующих эталонов. Планирование поверки СИ структурных подразделений с учетом использования эталонной базы МС
Подготовка к поверке СИ	Оснащенность МС	Невозможность выполнить поверку по причине отсутствия эталона (в поверке)	Приобретение соответствующего оборудования/СИ для обеспечения соответствия МС критериям аккредитации на право поверки СИ

регламентируются в определенных нормативных документах, таких как приказы Федерального агентства по техническому регулированию, в стандартах организации, методиках поверки СИ и других. Далее они должны быть учтены во всех аспектах разработки и функционирования СМК. Возможные участники данного процесса представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Заинтересованные стороны

№ п/п	Заинтересованная сторона	Документы, регламентирующие требования заинтересованных сторон
1	Органы власти (Минэкономразвития РФ, Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, Росаккредитация и др.)	Приказы
2	Вышестоящие организации	Приказы, Стандарты организаций
3	Центры стандартизации метрологии	Договора на оказание услуг
4	Институты метрологии	Приказы, методики поверки СИ
5	Предприятия-поставщики СИ	Договора на оказание услуг
6	Работники структурных подразделений	Стандарты предприятия

На основе проведенного анализа факторов среды, заинтересованных сторон и их требований может быть составлен перечень типовых рисков и возможностей на всех этапах процесса поверки СИ. Пример перечня приведен в таблице 3.

Таблица 3 – Пример перечня типовых рисков и возможностей поверки СИ

Этапы процесса поверки СИ	Факторы, заинтересованные стороны	Типовые риски	Возможности
1	2	3	4
Прием СИ	Квалификация работников МС; Работники структурных подразделений (ответственные за предоставление СИ в поверку)	1) Отсутствие СИ в графиках поверки 2) Предоставление не комплектного СИ в поверку	Внедрение автоматизированной системы учета СИ в структурных подразделениях
Создание условий проведения поверки СИ	Законодательство в области обеспечения единства измерений; Оснащённость МС; Нормативное обеспечение МС	1) Невыполнение персоналом установленных требований в ОЕИ 2) Невозможность создания 3) Невыполнение персоналом установленных требований в ОЕИ	Повышение квалификации работников МС; Приобретение вспомогательного оборудования (кондиционеры, увлажнители)

политик, процедур и методов к деятельности, связанной с коммуникациями и консультированием, установлением контекста и оценкой, обработкой, мониторингом, анализом, документированием и формированием отчетности по рискам [5]. Одним из первоочередных этапов является оценка рисков, состоящая из идентификации, анализа и оценки рисков. Далее более подробно будет рассмотрен этап идентификации.

В данном случае для начала следует определить факторы среды (внешние и внутренние), влияющие на выполнение поверочных работ МС. К внешним относятся факторы, не связанные с деятельностью предприятия (техногенные, политические, экономические и т.д.) Внутренние факторы – это причины производственных потерь, находящиеся внутри метрологической службы.

Примером одного из внутренних факторов является оснащенность метрологической службы (МС), то есть насколько современные и точные СИ используются на предприятии. Одним из внешних факторов может быть законодательство в области обеспечения единства измерений, то есть весь процесс поверки должен проводиться в заданных условиях, персоналом соответствующей квалификации, а результаты измерений фиксироваться и оформляться в соответствии с нормами и требованиями, указанными в нормативных документах по обеспечению единства измерений.

Перечень подобных факторов, влияющих на выполнение работ по обеспечению единства измерений в утвержденной области аккредитации (поверка СИ), приведен ниже в таблице 1.

Таблица 1 – Перечень факторов среды

№ п/п	Наименование фактора среды
Внешние факторы	
1	Законодательство в области обеспечения единства измерений
2	Перспективные технологии производства продукции
3	Рынок труда
4	Рынок СИ
Внутренние факторы	
1	Оснащенность МС (оборудование, СИ, окружающая среда)
2	Нормативное обеспечение (методики поверки СИ и др. документы по стандартизации)
3	Квалификация работников СИ
4	Соблюдение работниками МС установленных требований к ОЕИ

Обнаружено, что актуальным также является определение всех заинтересованных сторон, имеющих отношение к поверочной деятельности метрологической службы. Требования заинтересованных сторон

запуску новой продукции, открытию новых рынков, появлению новых потребителей, построению партнерских отношений, использованию новых технологий и других желаемых и реальных решений, чтобы учесть потребности организации или ее потребителей.

Процесс поверки СИ

Поверка СИ – установление органом метрологической службы (или другим официально уполномоченным органом, организацией) пригодности средств измерения к применению на основании экспериментально определяемых метрологических характеристик и подтверждения их соответствия обязательным требованиям [1]. Цель поверки – выяснить, соответствуют ли характеристики средства измерения регламентированным значениям и пригодно ли оно к применению по прямому назначению. Процесс поверки СИ представлен на рисунке 1. При составлении данной схемы был использован процессный подход, основные принципы которого представлены в ИСО 9001[4]. Требования данного стандарта распространяются на систему менеджмента качества (СМК) всего предприятия. В свою очередь действия СМК направлены и на метрологическую службу. Очевидно, что каждый этап поверки СИ, представленный на рисунке 1, имеет свои риски и возможности, влияющие на них факторы среды различны.

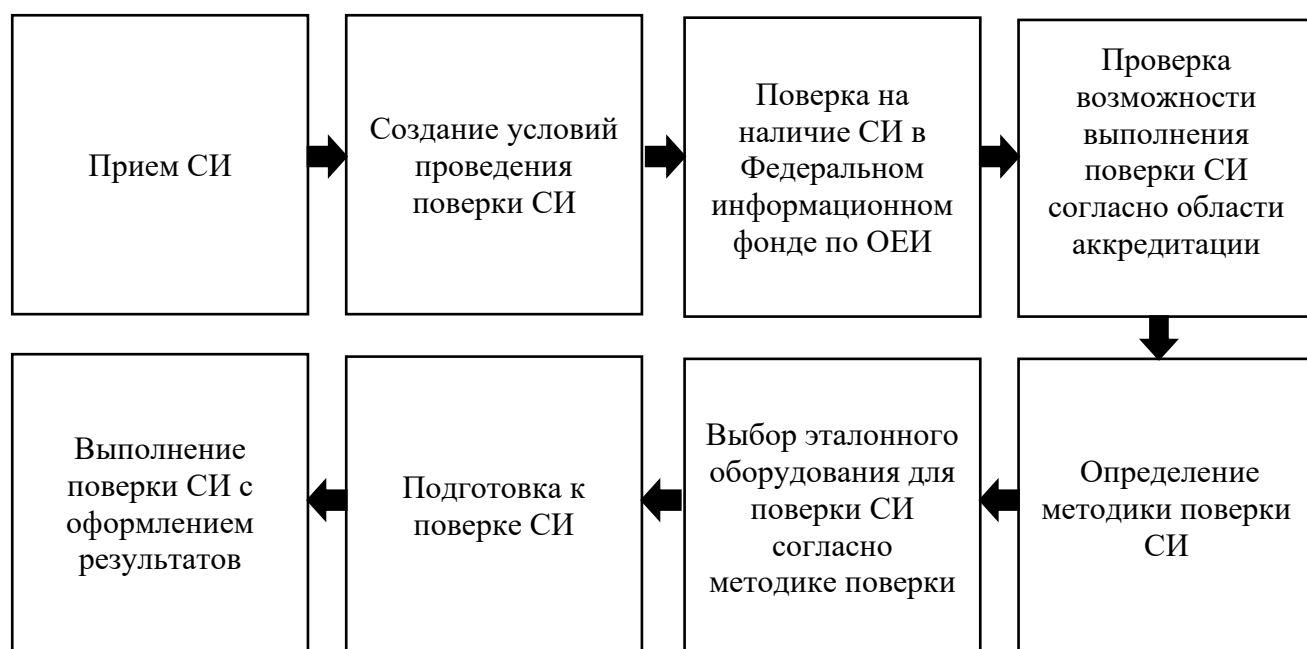


Рисунок 1 – Схема процесса поверки СИ

Идентификация типовых рисков и возможностей

Процесс управления рисками включает в себя систематическое применение

Первый подход рассматривает термины «риск» и «возможность» как некоторые события, которые могут произойти в будущем, а могут и не произойти. Менеджмент может влиять на вероятность возникновения события и на его последствия. Поэтому риск рассматривается как событие, имеющие негативные последствия, а возможность – позитивные последствия [3].

Во втором подходе «возможность» описывается как потенциальная возможность того или иного события, вне зависимости от того, негативное оно или позитивное. Риски рассматриваются в их классическом понимании: как комбинация вероятности возникновения события и значимости его последствий. Другими словами, возможности – это список потенциальных событий, а риски – это их оценка с точки зрения вероятности свершения и значимости последствий.

При третьем подходе «риск» рассматривают не только как потенциально негативное событие, но и как возможность для улучшения. «Возможности» при этом подходе трактуются как потенциал не только для прямых улучшений, но и для решения возникающих проблем. В этом случае, управление рисками связано как с негативными, так и с благоприятными исходами. Управление рисками в данном случае означает определять перспективы и выявлять возможности для совершенствования деятельности, а также не допускать или сокращать вероятность нежелательного хода событий.

В стандарте ИСО 9001 [4] указано, что в системе менеджмента качества организация должна учесть влияющие факторы, возможные требования и определить риски и возможности, подлежащие рассмотрению для:

- обеспечения уверенности в том, что система менеджмента качества может достичь своих намеченных результатов;
- увеличения их желаемого влияния;
- предотвращения или уменьшения их нежелательного влияния;
- достижения улучшения.

Для достижения любой из указанных целей нужно рассмотреть совокупность всех существующих рисков с их отрицательными и, возможно, положительными сторонами и всех вероятных возможностей, включая связанные с ними негативные риски, одновременно.

Рассмотрение наиболее часто используемых интерпретаций понятий «риск» и «возможность» показало, что в дальнейшем их следует рассматривать только совместно. Так, например, варианты реагирования на риски могут включать избежание риска, допущение риска с тем, чтобы отследить возможности, устранение источника риска, изменение вероятности или последствий, разделение риска или сдерживание риска путем принятия решения, основанного на информации. При этом возможности могут привести к принятию новых практик,

Романычева К.С., Спиридонов Д.М.

ТИПОВЫЕ РИСКИ И ВОЗМОЖНОСТИ ПРОЦЕССА ПОВЕРКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

Аннотация: В данной статье описываются цели, задачи, для определения и анализа типичных рисков и возможностей при проверке средств измерений в метрологической службе.

Ключевые слова: поверка средств измерений, метрологическая служба, идентификация, риски и возможности.

Annotation: This article describes targets, goals, determination and analysis of typical risks and capabilities during the verification of measuring instruments in the metrological service.

Keywords: verification of measuring instruments, metrological service, identification, risks and opportunities.

В настоящее время устойчивое развитие любого промышленного предприятия обуславливается многими факторами. Одним из самых популярных методов анализа их воздействия является оценка потенциальных рисков и возможностей. В связи с этим внедрение систем по их управлению становится повсеместным, в том числе и в деятельность метрологических служб (МС). В функционал МС входит поддержание средств измерения (СИ) в технически исправном состоянии, а также, при наличии соответствующей аккредитации: проведение регулярных поверок используемых на предприятии средств измерений, аттестация методик выполнения измерений, метрологическая экспертиза всех видов технической и нормативной документации, и т.д. [1]. Очевидно, что данная система управления рисками и возможностями направлена на предотвращение работ, выполняемых с нарушением установленных требований по обеспечению единства измерений (ОЕИ) в утвержденной области аккредитации. При этом очевидно, что указанные работы не всегда ярко выражены и легко идентифицируемы. В связи с этим целью настоящей работы является определение и анализ типовых рисков и возможностей процесса поверки средств измерений (СИ) в метрологической службе предприятия.

Понятие риск и возможность

Существует множество интерпретаций таких понятий, как риски и возможности. Согласно стандартам серии ИСО 9000 [2], выделяют три основных подхода для определения их взаимодействия.

Библиографический список

1. Марчук Ю. В. Системотехника. моделирование и компьютер в прогнозировании ретинопатии недоношенных / Ю. В. Марчук, С. Л. Гольдштейн, С. И. Блохина. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2013. – 158
2. Климкин А. С. Актуальные вопросы офтальмологии / А. С. Климкин, М. В. Медведева // Cyberleninka : электрон. журн. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennyy-vzglyad-na-problemu-retinopatii-nedonoshennyh> (accessed: 14.03.2020).
3. Пат. 2683758 Рос. Федерации, МПК А61В 3/18. Автоматизированная система анализа ангиографических изображений глазного дна человека : № 2018123368 : заявл. 27.06. 2018 : опубл. 01.04.2019 / Гуревич И. Б., Яшина В. В., Оспанов А. М., Федоров А. А. ; патентообладатель ФИЦ ИУ РАН. – 2 с.
4. Pat. WO/2020/005053. Portable system for identifying potential cases of diabetic macular oedema using image processing and artificial intelligence : N PCT/MX2019/000036 : Filing Date 12.04.2019 : Publication Date 02.01.2020 / SANTOS GARCÍA, ALTAMIRANO VALLEJO, APARICIO ROMERO [et al.]. – 3 p.
5. AI Eye Screening System : site. – URL: <https://www.eyenuk.com/en/products/eyeart/> (accessed: 14.03.2020).
6. Ильясова Н. Ю. Экспертная компьютерная система диагностики глазных заболеваний по изображениям глазного дна / Н. Ю. Ильясова, А. В. Устинов, В. Г. Баранов // Cyberleninka : электрон. журн. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekspertnaya-kompyuternaya-sistema-diagnostiki-glaznyh-zabolevaniy-po-izobrazheniyam-glaznogo-dna> (accessed: 14.03.2020).

Анализатор позволяет получить:

- 1) бинарные изображения с выделенными сосудами, объектами и образованиями, предназначенные для последующего анализа системой принятия решений;
- 2) морфометрические характеристики выделенных объектов:
 - плотность расположения сосудов,
 - средний диаметр сосудов,
 - среднеквадратическое отклонение диаметров сосудов,
 - общая длина сосудов;
- 3) бинарные изображения выделенных зоны васкуляризации;
- 4) площадь зоны васкуляризации в кв. мкм;
- 5) класс выделенных сосудов;
- 6) класс выделенной зоны васкуляризации.

Полученные данные являются входными для подсистемы принятия решений. Далее происходит анализ полученных данных, сравнение с эталонными данными из базы знаний, диагностирование. Структура базы знаний подробно описывается в патенте [3].

Заключение

В статье представлен обзор аналогов и прототипов ЭСД, проведено сравнение и выбран лучший из них. По результатам проведено алгоритмическое моделирование экспертной системы диагностики ретинопатии недоношенных и подсистемы анализатора изображений глазного дна. Предложены изменения – ввод новых блоков и модернизации уже существующих. Эти изменения адаптируют выбранный прототип экспертной системы диагностики под специфику РН и делают возможными разработку и реализацию автоматизированной экспертной системы диагностики ретинопатии недоношенных. Данная система предназначена для автоматизированной диагностики РН по снимкам глазного дна, ее классификации. Включает в себя подсистемы анализатора и подсистемы принятия решений, базу знаний.

Экспертная система диагностики ретинопатии недоношенных призвана с уменьшить риски несвоевременного диагностирования заболевания. Примером несвоевременности могут стать удаленные населенные пункты, в которых снимки глазного дна при отсутствии специалистов отправляют экспертам из региональных центров, таким образом увеличивая нагрузку на специалистов.